

Grötzebauch, H. & Heinicke S. (Hrsg.)

PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung

Fachverband Didaktik der Physik

Göttingen 2025

Zur Zeitschrift

Die Zeitschrift *Didaktik der Physik – Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung* (PhyDid B) ist eine leicht referierte open-access Internetzeitschrift. Sie beinhaltet die Tagungsbeiträge der Frühjahrstagung des Fachverbands *Didaktik der Physik* der *Deutschen Physikalischen Gesellschaft* (DPG). Alle Beiträge sind frei verfügbar. In der herunterladbaren Gesamtausgabe erscheinen nur die Artikel. Weitere Zusatzdateien wie z. B. Poster oder Filme sind über das open-access Portal von PhyDid B verfügbar.

PhyDid B umfasst Beiträge zu den Hauptvorträgen sowie den Rubriken *Anregungen aus dem Unterricht für den Unterricht, Astronomie, Grundschule, Hochschuldidaktik, Lehreraus- und Lehrerfortbildung, Lehr- und Lernforschung, Neue Konzepte, Neue Medien, Neue Versuche und Praktika, Quantenphysik, Studienreform-Forum Physik, und Weitere Themen.*

Zitierweise beispielsweise:

Grötzebauch, H. & Heinicke S. (Hrsg.). (2025). PhyDid B, Didaktik der Physik, Beiträge zur virtuellen DPG-Frühjahrstagung 2025. 379 S.
Url.: <https://ojs.dpg-physik.de/index.php/phydid-b/issue/view/297>
ISSN 2191-379X

Copyright Hinweise

Die einzelnen Autoren sind für die rechtmäßige Verwendung von eingereichten Beiträgen, Abbildungen, Hyperlinks und Zusatzmaterialien verantwortlich und tragen das alleinige Haftungsrisiko. Die Verantwortlichkeit für die Inhalte verlinkter fremder Webseiten liegt alleine bei dem Anbieter der Webseite. Wir distanzieren uns hiermit ausdrücklich von deren Inhalt und machen uns ihre Inhalte nicht zu Eigen.

Impressum

Die Veröffentlichung der Tagungsbände in PhyDid B erfolgt im Auftrag des Fachverbandes der Deutschen Physikalischen Gesellschaft.

Url: <https://ojs.dpg-physik.de/index.php/phydid-b/index>

ISSN: 2191-379X



Namensnennung - Nicht-kommerziell - Weitergabe unter gleichen Bedingungen

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/legalcode.de>

Inhaltsverzeichnis

Hochschuldidaktik

Belastungserleben von Lehramtsstudierenden in der Studieneingangsphase Physik	1
Deniz C. Senel, Simon Z. Lahme, Josefine Neuhaus, Pascal Klein	
Chunkingprozesse beim Lesen und Schreiben von Formeln	9
Josefine Neuhaus, Pascal Klein, Andreas Müller	
Ein interdisziplinäres Seminar für Lehramtsstudierende der Naturwissenschaften	17
Giulia Pantiri, Lea Mareike Burkhardt, Fatime Beka, Thomas Wilhelm, Volker Wenzel, Arnim Lühken, Dieter Katzenbach	
Multi-repräsentationale Lernaufgaben zur Vektoranalysis in der Studieneingangsphase	25
Larissa Hahn, Alexander Voigt, Philipp Mertsch, Pascal Klein	
Physikspezifische Betrachtungsweisen zur Förderung des Formelverständnisses	33
Julia Hofmann, Pascal Klein, Andreas Müller, Josefine Neuhaus	

Lehreraus- und Lehrerfortbildung

Analyse von Lehrkräfte-Netzwerken und deren Nutzung	41
Ramona Schauer-Bollig, Heidrun Heinke	
Einfluss von Eigenschaften der Innovation auf den Transfer in die Schulpraxis	47
Nils Haverkamp, Alexander Pusch, Stefan Heusler	
Kompetenzrahmen zur Gestaltung von Experimentierphasen	55
Teresa Tewordt, Lisa Stinken-Rösner	
MINT-Unterricht mit digitalen Medien adaptiv gestalten	63
Richard Schulte, Jasmin Mose, Elisa Held, Linda von Sobbe, Ulrike Franke, Anneke Schmidt, Walther Paravicini, Jan-Philipp Burde, Andreas Lachner	
Online-Selbstlernkurs zu digitalen Medien im Physikunterricht	71
David Weiler, Jan-Philipp Burde, Kasim Costan, Rike Gieshoff, Christoph Kulgemeyer, Armin Lässer, Katja Plicht, Josef Riese, Thomas Schubatzky	
Praxisorientiertes Fortbildungskonzept mit Selbstlerneinheiten zur Quantenphysik	79
Stefan Aehle, Kim Kappl, Philipp Scheiger	

Praxisorientiertes Fortbildungskonzept mit Selbstlerneinheiten zur Quantenphysik - Fokus auf die Wesenszüge der Quantenphysik und Analogiemodelle	85
Stefan Aehle, Kim Kappl, Philipp Scheiger	
Praxisorientiertes Fortbildungskonzept mit Selbstlerneinheiten zur Quantenphysik - Fokus auf Verschränkung und das quantenmechanische Weltbild	89
Philipp Scheiger, Kim Kappl, Stefan Aehle	
Wissenschaftsverständnis von Physiker:innen	95
Linda Zwick, Rita Wodzinski	
 Lehr- und Lernforschung	
Analoges Problemlösen auf dem Prüfstand: Reproduzierbarkeit und neue Erkenntnisse	103
Marco Seiter, Heiko Krabbe	
AufGezeichnet gelernt	111
Peter Michael Westhoff, Susanne Heinicke	
Auswirkungen eines MINT-Projekts auf die Motivation und die Selbstwirksamkeit	119
Tessa Horenburger, Dina Al-Kharabsheh, Anne Geese	
Das Interesse von Schülerinnen und Schülern an physikalischen Themen	125
Hermann Lidberg, Roger Erb	
Entwicklung und Validierung eines Testinstruments zu einfachen Stromkreisen	133
Benjamin Groß, Lana Ivanjek, Salome Flegr, Judith Glaesser, Augustin Kelava, Jan-Philipp Burde	
Ich bin mittendrin in der Katastrophe	141
Franziska Beisler, Jonathan Grothaus, Thomas Trefzger	
Interviewstudie zu Modellen einfacher Stromkreise	151
Katharina Leibfarth, Ulrich Trautwein, Peter Gerjet, Jan-Philipp Burde	
Komplementär vernetzte Bildungsangebote erforschen	159
Jonas Tischer, Michael Komorek	
Laserphysik im Lehr-Lern-Labor: Wie Lernumgebung und Disposition die intrinsische Motivation beeinflussen	167
Roman Kuhr (geb. Gruchow), Heidi Reinholz, Lukas Maczewsky	
Lesson Study plus	171
Christiane Richter, Kai Bliesmer, Michael Komorek	

Mach dein Gehirn fit für Physik	177
Laura Goldhorn, Thomas Wilhelm, Verena Spatz	
Mobiles Schülerlabor im Industriemuseum	183
Michael Komorek, Kai Bliesmer	
Motivation durch Wahl: Autonomieförderung im Physikunterricht	191
Laura Pannullo, Nils Kunisch	
Was motiviert Schüler*innen Lehramt zu studieren?	197
Lion Cornelius Glatz, Teemu Loh, Pauline Czora, Mark Ullrich, Holger Horz, Roger Erb	
Neue Konzepte	
Artikel-Memory zum Klimawandel	201
Julia Hädrich, Linus Bräumer, Rita Wodzinski	
Binnendifferenziertes Experimentieren zur Förderung der Variablenkontrollstrategie im Unterricht	207
Tobias Winkens, Nicolas Hartrumpf, Heidrun Heinke	
Blickwinkel von Lehrkräften auf außerschulische Angebote zur MINT-Interessenförderung	215
Maria Hinkelmann, Heidrun Heinke	
Educative Curriculum Materials zum Treibhauseffekt	221
Ivo Naake, Thomas Wilhelm	
Implementation modularer Smartphone-Experimente im Physikunterricht	227
Marija Herdt, Heidrun Heinke	
Konzipierung eines Workshops im MLeNa-Programm	235
Peer Bruns, Christina Lüders, Maria Hinkelmann, Tobias Winkens, Heidrun Heinke	
MINT-Lehrkräfte von morgen	243
Christina Lüders, Tobias Winkens, Maria Hinkelmann, Christian Salinga, Carina Göbels, Leonie Jung, Julia Tocco, Heike Theyßen, Bernadette Schorn, Heidrun Heinke	
Transformative BNE im Kontext Wasser	249
Kai Bliesmer, Michael Komorek, Tjorben Meyer	
Unterstützung in der Studieneingangsphase	257
Christina Lüders, Stefan Roth, Heidrun Heinke	
Upho	263
Nele Hack, Ramona Schauer-Bollig, Heidrun Heinke	

Was macht das K in MINKT? 271
Nathalie Wolke, Susanne Heinicke

Neue Medien

AR Physics Table 281
Fabian Bernstein, Thomas Wilhelm

ChatGPT im Lehr-Lern-Labor 285
Patrick Herz, Jens Damköhler, Wolfgang Lutz, Thomas Trefzger

Der ESP32 im Kontext MINT-Bereich 295
Kristina Holmann, Angela Fösel

**Einstellung von Lernenden zum Einsatz von (interaktiven)
Experimentiervideos** 301
Mathias Ziegler, Lisa Stinken-Rösner

**PUMA : Optiklabor in der Praxis – erste Erfahrungen mit der interaktiven
WebAR-Simulation** 309
Stefan Kraus, Thomas Trefzger

Smartphone-gestützte Experimente zur Quantenphysik 313
Johannes Schlaf, Dominik Dorsel, Sebastian Staacks, Christoph Stampfer,
Heidrun Heinke

Neue Versuche und Praktika

**Entwicklung von Lernzirkelstationen zur Variablenkontrollstrategie mit
geringem Materialaufwand** 321
Stephanie Gehnen, Tobias Winkens, Heidrun Heinke

**Praxiserfahrung mit Versuchsaufbauten zur Quantenoptik und
Konzeption einer didaktisch reduzierten Versuchsanleitung** 329
Nils Thormann, Sebastian Nell, Ralf Detemple, Heidrun Heinke

Quantenphysik

A Fundamental Path to Quantum Physics 337
Hans-Otto Carmesin

Didaktische Rekonstruktion zur Quantenbildgebung 347
Dustin-Philipp Preissler, Holger Cartarius

Entwicklung einer Versuchsanleitung zu Interferenz-Experimenten mit Einzel-Photonen im Rahmen eines Quantenoptik-Praktikums 353
Felipe Laumen, Sebastian Nell, Ralf Detemple, Heidrun Heinke

NV-Zentrum Magnetometer und sein didaktisches Konzept 359
Simon Koppenhöfer, Philipp Mauz, Philipp Scheiger

Praxisorientiertes Fortbildungskonzept mit Selbstlerneinheiten zur Quantenphysik - Fokus auf dem Nachweis der Quantennatur des Lichts und der Erzeugung einzelner Photonen 363
Kim Kappl, Stefan Aehle, Philipp Scheiger

Von den Anfängen zur Anwendung: 5 Jahre Competence Framework for Quantum Technologies 367
Franziska Greinert, Rainer Müller

Studienreform-Forum Physik

Zahllose didaktische Verbesserungsideen und dennoch bleibt alles beim Alten? 371
Barbara Obwaller, Stefan Brackertz, Annemarie Sich, Lisa Marie Lehmann, Simon Tautz, Jonathan Moeller, Manuel Längle, Ayan Amalie Osman Mohamed, Edwin Eobaldt, Eva-Maria Odörfer, Franz-Josef Schmitt, Magdalena Micoloi, Matti Wetzig, Philipp Hell, Robert Wild

Tagungsprogramm

Url: <https://www.dpg-verhandlungen.de/year/2025/conference/goettingen/part/dd>

Belastungserleben von Lehramtsstudierenden in der Studieneingangsphase Physik

Deniz C. Senel^{1,2,a}, Simon Z. Lahme¹, Josefine Neuhaus¹, Pascal Klein^{1,b}

¹Georg-August-Universität Göttingen, Physik und ihre Didaktik, Friedrich Hund-Platz 1, 37077 Göttingen

²I. Physikalisches Institut (IA), RWTH Aachen, Sommerfeldstraße 16, 52074 Aachen

^asenel@physik.rwth-aachen.de, ^bpascal.klein@uni-goettingen.de

Kurzfassung

Angesichts niedriger Einschreibungszahlen und hoher Studienabbruchquoten insbesondere in der Studieneingangsphase stellt sich vor dem Hintergrund des anhaltenden Mangels an qualifizierten MINT-Lehrkräften die Frage, wie die Studieneingangsphase gerade auch im Fach Physik adressatengerecht gestaltet werden kann, um langfristig den Studienerfolg der Lehramtsstudierenden zu sichern. Im Rahmen des Projekts „Belastungstrajektorie“ wurden daher an der Universität Göttingen sechs Gruppeninterviews mit 18 Physiklehramtsstudierenden durchgeführt, um aus ihrer Perspektive die für das Lehramtsstudium Physik spezifischen Belastungsquellen und Wünsche zu Unterstützungsmaßnahmen und studienstrukturellen Veränderungen qualitativ zu erfassen. Eine qualitative Inhaltsanalyse zeigt, dass das Belastungserleben von Physiklehramtsstudierenden besonders durch die empfundene mangelnde Passung zwischen Studium und Beruf sowie durch das hohe fachliche Anforderungsniveau geprägt ist. Gleichzeitig werden konkrete Wünsche wie die stärkere schulische Orientierung des Studiums und curriculare Differenzierungen in Abgrenzung zum Hauptfachstudium formuliert, die Ansatzpunkte für die Optimierung der Lehrkräfteausbildung liefern.

1 Motivation und Forschungsstand

Die Ausbildung von Physiklehrkräften in Deutschland stellt nach wie vor eine bildungspolitische Herausforderung dar. Verschiedene Prognosen verweisen auf den eklatanten Mangel an Lehrkräften, insbesondere im MINT-Bereich. So geht Klemm (2020) davon aus, dass für das Fach Physik in Nordrhein-Westfalen bis zum Jahr 2030/31 nur 18,1 % aller Lehrkräftestellen besetzt werden können – ein Befund, der sich qualitativ auch auf Bundesebene übertragen lässt. So prognostiziert die Ständige Wissenschaftliche Kommission (SWK, 2023) bis 2025 einen bundesweiten Mangel von rund 25.000 Lehrkräften, besonders in den Naturwissenschaften.

Dieser Mangel ist dabei einerseits auf geringe Einschreibungszahlen zurückzuführen. Andererseits verschärft sich diese Problematik noch durch die hohe Quote an Studienwechseln und -abbrüchen. So schließt lediglich etwa ein Viertel der eingeschriebenen Lehramtsstudierenden ihr Studium im Fach Physik erfolgreich ab (Düchs & Runge, 2024). Ein Studienabbruch erfolgt dabei im Allgemeinen häufig in der Studieneingangsphase (Heublein et al., 2022). Für das Studienfach Physik konnten dabei als mögliche Ursachen für Studienabbruch u. a. unzureichende Studienvoraussetzungen (z. B. mathematische Vorkenntnisse), eine mangelnde Studienmotivation, überfordernde Studienbedingungen (z. B. hohe Anforderungen) sowie private oder soziale Belastungsfaktoren identifiziert werden (Albrecht, 2011; Heublein et al., 2022).

Die Studieneingangsphase stellt damit für viele Studierende eine kritische Phase dar, die mit vielen Herausforderungen wie der Eingewöhnung in ein neues soziales Umfeld und der Bewältigung eines akademischen Identitätsbildungsprozesses (vgl. Holmegaard,

2014) einhergeht. Diese Herausforderungen können bei den Studierenden zu einem erhöhten Stress- bzw. Belastungserleben führen. Dieses wurde bereits in verschiedenen Arbeiten aus der Perspektive der Naturwissenschaftsfachdidaktiken beleuchtet (z. B. Lahme et al., 2024b; Schwedler, 2017). Im Projekt „Belastungstrajektorie“ werden an der Universität Göttingen das Belastungserleben der Physikstudierenden und die zugrundeliegenden Belastungsquellen im Verlauf der Studieneingangsphase Physik untersucht (Lahme et al., 2024b). Die Ergebnisse zeigen u. a., dass die Belastungsquellen primär nicht im privaten (z. B. soziales Umfeld) oder globalen (z. B. Work-Life-Balance, Studienfinanzierung), sondern im universitären Bereich liegen (z. B. Übungsblätter, Prüfungen und Prüfungsvorbereitung, Praktikumsprotokolle und Mathematik-Lehrveranstaltungen). Die Studie unterschied aufgrund der deutlich geringeren Anzahl an Lehramtsstudierenden jedoch nicht zwischen den Physikhauptfach- und den Physiklehramtsstudierenden, die im ersten Studienjahr viele Fachveranstaltungen gemeinsam besuchen.

Dies rückt die Frage in den Fokus, wie sich das Belastungserleben und insbesondere die Belastungsquellen zwischen Lehramts- und Hauptfachstudierenden (qualitativ) unterscheiden. Dass es Unterschiede und insbesondere für das Lehramtsstudium spezifische Belastungsquellen geben dürfte, legen die Unterschiede in der Studienstruktur, der institutionellen Einbindung und der beruflichen Zielperspektive nahe. Außerdem zeigte die im Jahr 2023 veröffentlichte Studie der Deutschen Physikalischen Gesellschaft (DPG) eine ambivalente Wahrnehmung des Lehramtsstudiums Physik in Deutschland unter den 1006 befragten Physiklehramtsstudierenden an 48 deutschen Hochschulen. Während die Einschätzungen auf metrischen Skalen etwa zur Motivation

für das Studium, dem empfundenen Integrationsgefühl in der Fachwissenschaft sowie der Wahrnehmung der Angemessenheit der Ausbildung überwiegend positiv ausfielen, zeigten sich in den Freitextantworten auch Kritikpunkte am Lehramtsstudium Physik. Viele Studierende wünschten sich etwa eine bessere Verzahnung zwischen Theorie und Praxis, eine stärkere Integration fachdidaktischer Inhalte sowie einen höheren Praxisanteil. Neben der fehlenden schulpraktischen Relevanz äußerten die Befragten mitunter auch eine als unzureichend empfundene Wertschätzung von Lehramtsstudierenden innerhalb der Fachbereiche Physik. Diese Kritikpunkte weisen nicht nur auf Wünsche der Studierenden zur Verbesserung des Physiklehramtsstudiums hin, sondern könnten sich auch im Belastungserleben der Studierenden niederschlagen.

Die vorliegende Arbeit setzt sich daher konkreter mit der Perspektive der Physiklehramtsstudierenden in Bezug auf spezifische Belastungsquellen und Wünsche nach Verbesserungen des Physiklehramtsstudiums auseinander. Ziel ist dabei, die konkreten Spezifika des Lehramtsstudiums zu erfassen, um langfristig adressatengerechnete Maßnahmen ableiten zu können. Dazu werden die folgenden Forschungsfragen verfolgt:

FF1: Welche für das Lehramt spezifischen Aspekte charakterisieren das Belastungserleben von Physiklehramtsstudierenden in der Studieneingangsphase?

FF2: Welche Argumente und Begründungen äußern die Lehramtsstudierenden bezüglich dieser Belastungsquellen?

FF3: Welche Wünsche und Vorschläge äußern die Lehramtsstudierenden zur Verbesserung der Studienbedingungen in der Studieneingangsphase der Physiklehramtsausbildung?

2 Methodik

2.1 Leitfadengestützte Gruppeninterviews

Die Basis zur Beantwortung der drei Forschungsfragen bilden sechs Gruppeninterviews mit jeweils drei Physiklehramtsstudierenden, die im Zeitraum von Dezember 2023 bis Frühjahr 2024 an der Universität Göttingen durchgeführt wurden. Die Gruppen befanden sich dabei im dritten (eine Gruppe), vierten (drei Gruppen) und sechsten Fachsemester (zwei Gruppen). Von den insgesamt 18 Teilnehmenden waren sechs weiblich. Die Zweifächer setzten sich aus Mathematik (fünf Personen), Naturwissenschaften wie Biologie oder Chemie (vier Personen), Geisteswissenschaften und Sprachen wie Englisch oder Geschichte (fünf Personen) sowie Sport (vier Personen) zusammen. Eine Person hatte zum Interviewzeitpunkt bereits auf ein anderes Lehramtsfach gewechselt, brachte aber ihre Erfahrungen aus zwei Semestern Physiklehramtsstudium mit ein.

Ziel der Interviews war es, Belastungsquellen und deren Wirkmechanismen in der Studieneingangsphase,

sowie Studierendenwünsche zu Unterstützungsangeboten und studienstrukturellen Veränderungen zu erfassen. Hierzu wurden Studierende höherer Semester in den Interviews zu einer retrospektiven Reflexion ihres Erlebens der Studieneingangsphase angeregt. Die leitfadengestützten Interviews mit einer Länge von etwa 90 bis 100 Minuten wurden durch drei Aufgaben strukturiert. Zunächst sortierten die Studierenden vorgegebene Karten mit typischen Belastungsquellen der Studieneingangsphase Physik (vgl. Lahme et al., 2024b) in einer Art Ampelsystem nach niedriger (grün), mittlerer (gelb) und hoher Belastung (rot). Aufbauend auf dieser Sortierung wurden zunächst die Karten im roten Bereich und anschließend die im grünen Bereich vertiefend diskutiert, um die zugrundeliegenden Ursachen und Mechanismen der jeweiligen Belastungsquellen zu reflektieren. In der zweiten Aufgabe wählten die Interviewten einen Aspekt, der zu Beginn des Studiums als belastend empfunden wurde, zum Zeitpunkt der Interviews jedoch keine hohe Belastung mehr darstellte. Die Studierenden notierten zunächst individuell, welche Strategien oder Entwicklungen bei ihnen zu dieser veränderten Wahrnehmung geführt haben, und diskutierten diese anschließend in der Gruppe. Die dritte Aufgabe bestand darin, dass die Studierenden einen Wunschzettel anfertigen sollten, auf dem sie ihre Wünsche und Verbesserungsvorschläge für die Lehre und potenzielle Zusatzangebote in der Physik notierten, die letztendlich auf die Reduzierung ihres Belastungserlebens abzielen. Abschließend wurde noch einmal explizit gefragt, ob die Teilnehmenden bezüglich der vorangegangenen Themen noch lehramtsspezifische Aspekte ergänzen wollten. Eine ausführliche Darstellung des Interviewkonzepts und des Leitfadens findet sich bei Lahme et al. (2024a).

2.2 Datenanalyse

Mit Blick auf die drei Forschungsfragen dieser Arbeit ging es darum, in den Interviews nur die für das Lehramtsstudium Physik spezifischen Belastungsquellen und Wünsche für Unterstützungs- bzw. Verbesserungsmaßnahmen zu identifizieren. Das bedeutet insbesondere, dass in der Analyse jene Aspekte nicht berücksichtigt wurden, die nicht ausschließlich lehramtsspezifisch sind, sondern gleichermaßen z. B. auch für Studierende des reinen Physikstudiums gelten (z. B. Vorlesungen, Klausuren, Übungen). Daher wurde das Datenmaterial zunächst mit Blick auf die Lehramtsspezifika vorsortiert. Eine Interviewpassage wurde demnach als „lehramtsspezifisch“ klassifiziert, wenn sie mindestens einen der folgenden Aspekte beinhaltete:

1. Aussagen zu lehramtsspezifischen Modulen im (Physik-)Studium, die ausschließlich Lehramtsstudierende betreffen.
2. Aussagen und Vergleiche zu einem Fach im Lehramtsstudiengang, das nicht Physik ist.

3. Vergleiche zwischen dem Hauptfach- bzw. Nebenfachstudium Physik und dem Lehramtsstudium Physik (z. B. im Hinblick auf Studienstruktur und Studieninhalte).
4. Aussagen zu universitären Rahmenbedingungen, die charakteristisch für das Lehramtsstudium sind (z. B. Pendeln zwischen Fakultäten).
5. Sämtliche Aussagen bezüglich der beruflichen Perspektive als Lehrkraft und dem Studium als Teil der berufsbezogenen Professionalisierung (z. B. Konsequenzen des Studiums für den Lehrer:innenberuf).

Diese so vorselektierten Interviewausschnitte wurden dann im Rahmen einer qualitativen Inhaltsanalyse nach Mayring (2015) zu einer induktiven Kategorienbildung herangezogen, wobei deduktiv zwischen den beiden Dimension „Belastungsquellen“ (vgl. FF1) und „Wünsche“ (vgl. FF3) unterschieden wurde. Diesen beiden Dimensionen sind dann verschiedene Kategorien zugeordnet, teilweise um Subkategorien ausgeschärft, um die von den Studierenden benannten Gründe und Argumente für das Belastungserleben (vgl. FF2) differenzierter abbilden zu können.

Zur Sicherung der Reliabilität des Kategoriensystems wurde mit einer studentischen Hilfskraft ein Interrating von etwa einem Viertel des Gesamtdatenmaterials durchgeführt. Bereits vor einer gemeinsamen Diskussion lag das Cohens Kappa bei $\kappa_{\text{prä}} = .69$ (substantial). Im Zuge der Diskussion zwischen den beiden Interratern und einem am Rating nicht beteiligten Co-Autor wurden die Kodierregeln und Kategorien nachgeschärft, z. B. durch präzisere Formulierungen, eine stärkere inhaltliche Abgrenzung der Kategorien und die Aufnahme repräsentativer Beispiele im Kategoriensystem. Dadurch konnte der Wert auf $\kappa_{\text{post}} = .90$ (almost perfect) gesteigert wer-

den (Landis & Koch, 1977). Das finale Kategoriensystem und die entsprechenden Kodierregeln sind diesem Beitrag als Zusatzmaterial beigefügt.

3 Kategoriensystem

3.1 Dimension „Belastungsquellen“

Die Dimension „Belastungsquellen“ beinhaltet Aspekte, die bei den Studierenden ein individuelles Belastungserleben erzeugen und im direkten Zusammenhang mit ihrem Physiklehramtsstudium stehen. Das entwickelte Kategoriensystem zu dieser Dimension umfasst sieben übergeordnete Kategorien (s. Abbildung 1).

Ein in den studentischen Aussagen wiederkehrendes Problem stellt die mangelnde Passung zwischen den physikalischen Studieninhalten und den Anforderungen des späteren Lehrberufs dar (Q1). Insbesondere werden eine fehlende Orientierung der Studieninhalte an schulischen Lehrplänen (Q1.1) und die geringe Relevanz für die spätere Unterrichts- bzw. Schulpraxis kritisiert. Die Inhalte des Studiums werden als zu abstrakt, zu komplex und wenig anwendungsbezogen beschrieben. Darüber hinaus bemängeln die Studierenden eine unzureichende Ausbildung der fachdidaktischen Kompetenzen, die für den späteren Unterricht notwendig wären (Q1.2). Eng damit verbunden ist das als zu hoch empfundene Anforderungsniveau im Physikstudium, insbesondere im ersten Studienjahr (Q2). Dies betrifft vor allem die mathematischen und physikalischen Grundlagen, die den Studierenden zufolge oft nicht ausreichend auf die Vorkenntnisse der Lehramtsstudierenden abgestimmt sind. Viele berichten, dass die Lehrveranstaltungen stärker auf die Bedürfnisse der Fachstudierenden ausgerichtet seien, wodurch Lehramtsstudierende einen zusätzlichen Aufwand betreiben müssten, um das gleiche Niveau zu erreichen.

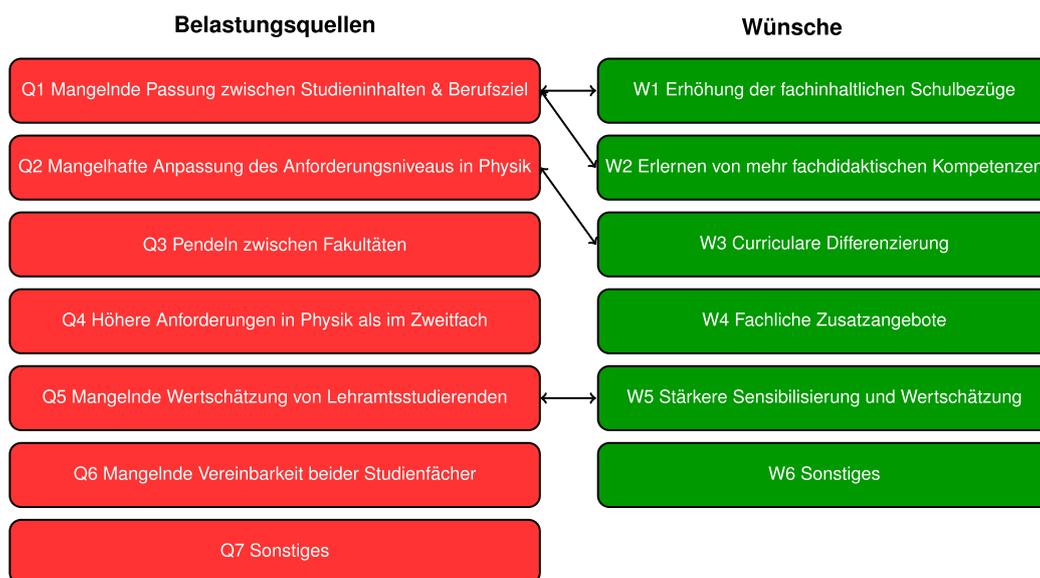


Abb. 1: Visualisierung der Hauptkategorien des Kategoriensystems (eigene Darstellung).

Neben den inhaltlichen Herausforderungen gibt es auch organisatorische Belastungen. Besonders das Pendeln zwischen verschiedenen Fakultäten wird als zeitaufwändig wahrgenommen (Q3). Dies verursacht nicht nur Zeitverluste, sondern erschwert auch die Planung von Pausen und die Sozialisierung innerhalb der Fakultäten.

Ein weiterer Belastungsfaktor entsteht durch die Diskrepanz im erlebten Arbeitsaufwand und Anforderungsniveau zwischen Physik und dem Zweitfach (Q4). Viele Studierende berichten, dass das Physikstudium den Großteil ihrer Studienzeit einnimmt (Q4.1) und sie ihr Zweitfach häufig vernachlässigen müssten. Diese Diskrepanz wird nicht nur als zeitliche Belastung, sondern auch als ungerecht empfunden, da beide Fächer formal gleichwertig im Lehramtsstudium berücksichtigt werden sollten. Physik sei jedoch von den Anforderungen her deutlich komplexer (Q4.2).

Neben diesen strukturellen Herausforderungen empfinden die Lehramtsstudierenden mitunter auch eine mangelnde Wertschätzung innerhalb der Physikfakultät (Q5). Sie berichten, dass sie sich sowohl von den Fachstudierenden als auch von den Dozierenden nicht immer ernst genommen fühlen würden. Dies äußere sich in Form eines empfundenen mangelnden Verständnisses (Q5.1) oder einer wahrgenommenen abwertenden Haltung (Q5.2) gegenüber Lehramtsstudierenden.

Zusätzlich erschwert aus Studierenden­sicht eine mangelnde organisatorische Abstimmung zwischen den beiden Studienfächern das Lehramtsstudium (Q6). Insbesondere zeitliche Überschneidungen von Lehrveranstaltungen und Prüfungen stellen eine Erschwernis dar (Q6.1). Zudem kann der hohe kombinierte Arbeitsaufwand beider Fächer zu einer empfundenen Belastung führen, insbesondere wenn die Studierenden zwei Studienfächer parallel absolvieren müssen, die jeweils einen individuell hohen Workload aufweisen, etwa Physik und Mathematik (Q6.2). Dies erschwert ihrer Ansicht nach nicht nur die zeitliche Koordination, sondern kann auch zulasten der sozialen Integration in die jeweiligen Fachkulturen gehen.

Schließlich gibt es noch lehramtsspezifische Belastungsquellen, die sich nicht eindeutig in die anderen Kategorien einordnen lassen (Q7). Dazu zählen z. B. Reflexionen über die spätere Berufstätigkeit sowie Überlegungen zu fachkulturellen Unterschieden und Motivationsverlusten im Studium.

3.2 Dimension „Wünsche“

Die Dimension „Wünsche“ bezieht sich auf Anliegen der Studierenden an die Universität, bei denen sie Verbesserungsvorschläge oder konkrete Vorstellungen zur Veränderung ihrer Studiensituation im Physiklehramtsstudium äußern. Hier wurde nur dann ein Wunsch kodiert, wenn sich aus der Aussage der

Wunsch nach einer Veränderung des Status quo ableiten ließ. Auch Positivbeispiele, in denen ein bereits erlebter Aspekt als wünschenswert hervorgehoben wurde, wurden kodiert. Im Zuge der Analyse konnten sechs Hauptkategorien identifiziert werden (s. Abbildung 1). Diese spiegeln häufig Aspekte wieder, die in den Belastungsquellen zuvor kritisch benannt wurden.

Ein zentrales Anliegen stellt die Erhöhung der fachinhaltlichen Schulbezüge (W1) dar. Die Studierenden wünschen sich eine stärkere Berufsorientierung in den frühen Semestern, insbesondere eine stärkere Orientierung an den bundeslandspezifischen Kerncurricula sowie an den bundesweiten Bildungsstandards, um die schulische Relevanz der Inhalte zu gewährleisten. Besonders die Module, die nicht speziell für Lehramtsstudierende konzipiert sind, werden als berufsfern empfunden.

Auch der Wunsch nach einer vertieften Entwicklung schulpraktischer Kompetenzen zeigt, dass die vorhandene didaktische Ausbildung von den Studierenden als unzureichend empfunden wird (W2). Genannt wird der Wunsch nach einer intensiveren Auseinandersetzung mit schultypischen Experimenten sowie der verstärkte Erwerb didaktischer Kompetenzen, um physikalische Sachverhalte schulgerecht aufbereiten zu können.

Ein weiterer zentraler Wunsch betrifft die curriculare Differenzierung bzw. Anpassung (W3) des Physikstudiums für Lehramtsstudierende im Vergleich zu dem für Hauptfachstudierende. Die Lehramtsstudierenden schlagen vor, die fachlichen und mathematischen Anforderungen stärker an ihre Bedürfnisse anzupassen – etwa durch andere Prüfungsformen (z. B. mündliche Prüfungen) oder die Einführung lehramtsspezifischer Veranstaltungen zu Studienbeginn. Zudem wird eine verpflichtende lehramtsspezifische Mathematikförderung gewünscht, da die mathematische Ausbildung als unzureichend empfunden wird.

Neben diesen intracurricularen Anpassungen werden fachliche Zusatzangebote (W4) vorgeschlagen, die eine kompensatorische Funktion erfüllen sollen. Genannt werden insbesondere fakultative Tutorien oder Zusatzübungen für Lehramtsstudierende, um den Einstieg zu erleichtern und fachliche Defizite auszugleichen, vor allem im Bereich der Mathematik.

Die Studierenden äußern außerdem den Wunsch nach mehr Wertschätzung und größerer Sensibilität der Lehrenden und Hauptfachstudierenden für ihre spezifischen Herausforderungen (W5).

Weitere Wünsche (W6), die keiner der genannten Kategorien zugeordnet werden können, umfassen z. B. eine flexiblere Modulwahl oder eine stärkere Unterstützung bei der Studienplanung.

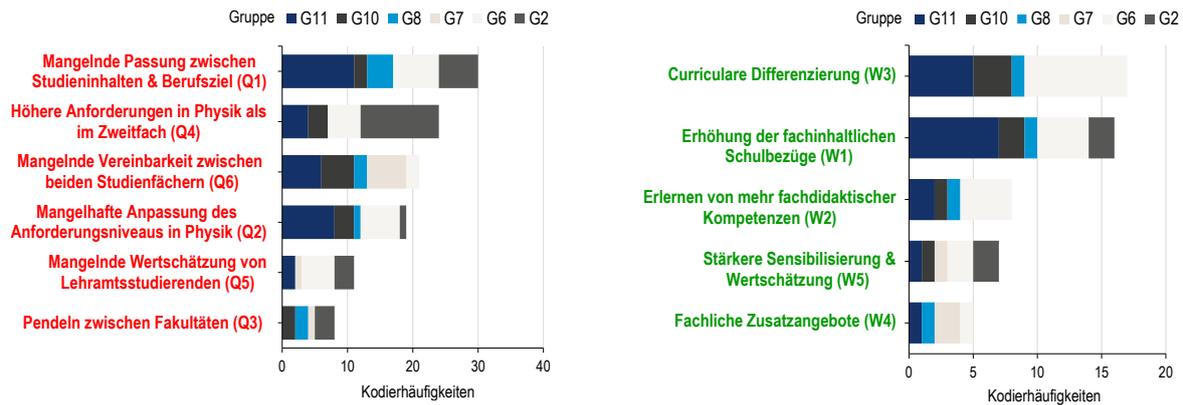


Abb. 2: Globale und gruppenspezifische Kodierhäufigkeiten der Hauptkategorien zu den für das Lehramtsstudium Physik spezifischen Belastungsquellen (links, rot) und Wünschen (rechts, grün) nach Unterstützungsmaßnahmen und studienstrukturellen Veränderungen (eigene Darstellung).

4 Ergebnisse

In Abbildung 2 sind die globalen sowie gruppenspezifischen Kodierhäufigkeiten der Hauptkategorien für beide Dimensionen dargestellt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurden ausschließlich die übergeordneten Kategorien visualisiert. Insgesamt wurden 187 Kodierungen vorgenommen. Davon entfallen 124 Kodierungen (ca. 66 %) auf die Dimension der Belastungsquellen und 63 Kodierungen (ca. 34 %) auf die Wünsche.

Am häufigsten wurde mit 30 Kodierungen die Kategorie „Q1: Mangelnde Passung zwischen Studieninhalten und Berufsziel“ genannt, gefolgt von „Q4: Höhere Anforderungen in Physik als im Zweitfach“ mit 24 Nennungen und „Q2: Mangelhafte Anpassung des Anforderungsniveaus in Physik“ mit 16 Nennungen. Auf der Seite der Wünsche wurden besonders häufig die Kategorien „W3: Curriculare Differenzierung“ (17 Nennungen) und „W1: Erhöhung der fachinhaltlichen Schulbezüge“ (16 Nennungen) kodiert. Diese fünf Kategorien machen zusammen knapp über die Hälfte aller Kodierungen aus und markieren zentrale thematische Schwerpunkte in fünf der sechs Gruppendiskussionen.

Neben der Gesamtverteilung der Kategorien bietet auch die gruppenspezifische Auswertung wichtige Einblicke in die thematischen Schwerpunkte der Gruppendiskussionen. Dabei zeigt sich, dass einzelne Gruppen spezifische Belastungsschwerpunkte und Wünsche besonders stark gewichten. So diskutieren die Gruppen G2 und G6 die inhaltliche Passung des Physikstudiums zum Berufsziel Lehrkraft, da die Inhalte des Physikstudiums in ihren Augen kaum auf die Anforderungen des schulischen Unterrichts vorbereiten (Q1). Diese Diskrepanz zwischen fachwissenschaftlicher Ausrichtung und beruflicher Relevanz mündet in den wiederholt geäußerten Wunsch nach einer stärkeren schulischen Orientierung (W1) in sowie einer curricularen Differenzierung (W3) in Gruppe G6. Darüber hinaus stellt in Gruppe G2 noch die empfundene Diskrepanz zwischen dem Anspruchsniveau beider Studienfächer ein wichtiges

Thema dar. Die Studierenden schildern eine überproportionale Beanspruchung durch das Fach Physik im Vergleich zum Zweitfach im Studienalltag und verweisen in dem Zusammenhang auf ein Gefühl permanenter Überforderung.

In Gruppe G7 wird die hohe Belastung durch das gleichzeitige Studium zweier MINT-Fächer wie Physik, Mathematik oder Informatik thematisiert. Die Studierenden berichten von einem hohen Aufwand durch Übungsaufgaben und von Herausforderungen bei der zeitlichen Koordination beider Fächer (Q6). Gleichzeitig wird ein Mangel an Wertschätzung gegenüber Lehramtsstudierenden (Q5) spürbar, mit dem der Wunsch nach einer stärkeren Anerkennung und Sensibilisierung für die spezifischen Belastungen des Lehramtsstudiums einhergeht (W5).

Gruppe G8 thematisiert ebenfalls die Schwierigkeit der Vereinbarkeit beider Studienfächer (Q6), auch in Hinblick auf das Pendeln zwischen Standorten (Q3), und verweist zusätzlich auf die unzureichende Abstimmung zwischen fachwissenschaftlichen und fachdidaktischen Studienanteilen im Hinblick auf die spätere Berufstätigkeit (Q1). Daraus ergibt sich unter anderem der Wunsch nach zusätzlichen Unterstützungsangeboten in der Studieneingangsphase (W4), etwa zur besseren Verknüpfung von Theorie und Praxis.

Die Gruppen G10 und G11 diskutieren besonders intensiv die als zu hoch empfundenen fachlichen Anforderungen im Vergleich zu Hauptfachstudierenden (Q2). Beide Gruppen berichten von Schwierigkeiten in physikalischen Modulen und Praktika, insbesondere durch fehlendes Vorwissen und Kompetenzen. Diese Ungleichheit zwischen Lehramts- und Fachphysikstudierenden wird von den Studierenden mit strukturellen Vorschlägen beantwortet: Sie wünschen sich eine stärkere curriculare Differenzierung (W3) oder gar eine frühzeitigere Trennung zwischen Lehramts- und Hauptfachstudierenden und eine gezielte Ausrichtung auf lehramtspezifische Kompetenzen. Die Gruppe G11 betont zusätzlich die

fehlende schulische Anschlussfähigkeit der Inhalte (Q1) und äußert den Wunsch nach mehr didaktischen Bezügen in der Studieneingangsphase (W1).

5 Diskussion

Bei mehreren Kategorien lässt sich eine direkte inhaltliche Passung zwischen den Kategorien für Belastungsquellen und Wünschen erkennen (vgl. Abbildung 1). So steht Q1 häufig im Zusammenhang mit W1, da die Studierenden die Studieninhalte als zu theoretisch und zu wenig schulrelevant empfinden und sich eine stärkere Orientierung an schulischen Praxisanforderungen wünschen. Ähnliches gilt für Q2 und W3, da die Kritik am hohen fachlichen Anforderungsniveau häufig mit der Forderung nach einer stärkeren curricularen Differenzierung für unterschiedliche Studiengänge einhergeht. Auch zwischen Q5 (Abwertung von Lehramtsstudierenden) und W5 (Sensibilisierung und Wertschätzung) besteht ein inhaltlicher Bezug, der sich in den Gruppendiskussionen wiederfindet. Diese Passungen zeigen, dass die Studierenden nicht nur Belastungen beschreiben, sondern diese auch konstruktiv in konkrete Verbesserungsvorschläge umformen.

Die Ergebnisse zeigen zudem deutliche Parallelen zu bestehenden Befunden zum Belastungserleben und den Bedürfnissen von Physiklehramtsstudierenden. Besonders in der DPG-Studie zum Lehramtsstudium Physik in Deutschland (Woitzik et al., 2023), in der u. a. Freitextantworten zur Angemessenheit des Physiklehramtsstudiums ausgewertet wurden, lassen sich viele der hier identifizierten Kategorien wiederfinden. Ein zentraler Kritikpunkt in der dortigen Befragung ist der als unzureichend empfundene Schul- bzw. Praxisbezug, der mit einem Wunsch nach mehr Fachdidaktik und Pädagogik und weniger Fachphysik einhergeht. Diese Überlegungen tauchen auch in den Gruppeninterviews in dieser Arbeit auf, und zwar sowohl in der Belastungsquelle Q1 zur mangelnden Passung zwischen Studieninhalten und Berufsziel als auch in den Wünschen W1 und W2 nach der Erhöhung fachinhaltlicher Schulbezüge und dem vertieften Erlernen fachdidaktischer Kompetenzen. Ein weiterer Aspekt in der DPG-Studie sind die von den Studierenden als (zu) hoch empfundenen fachlichen Anforderungen und der entsprechende Wunsch nach einer stärkeren Auslegung der Fachvorlesungen für das Lehramt. Auch dieser Aspekt findet sich im Kategoriensystem dieser Arbeit in Form der Belastungsquelle Q2 zur mangelnden Anpassung des inhaltlichen Anforderungsniveaus und den Wünschen nach curricularen Differenzierung (W3) und fachlichen Zusatzangeboten (W4) wieder; ähnlich weisen auch Lüders et al. (2020) auf den Bedarf an adressatenspezifischen Unterstützungsmaßnahmen wie Tutorien oder angepassten Praktika für Lehramtsstudierende hin. Darüber hinaus äußerten die Befragten in der DPG-Studie auch den Wunsch nach mehr Wertschätzung gegenüber Lehramtsstudierenden, was in dieser Arbeit den Kategorien Q5 und W5 entspricht.

Einige Aussagen der Studierenden in dieser Interviewstudie sollten jedoch kritisch reflektiert werden.

So lassen sich in mehreren Passagen etwa Fehleinschätzungen zur fehlenden Relevanz der Quantenmechanik im schulischen Curriculum oder zur Struktur der fachdidaktischen Ausbildung im Studium erkennen, die teilweise z. B. auf mangelnde Kenntnisse der Studieninhalte höherer Studiensemester oder Fehlvorstellungen in Bezug auf schulische Curricula zurückzuführen sind. Derartige Aussagen machen deutlich, dass das Belastungserleben und die Wahrnehmung des Physiklehramtsstudiums im Allgemeinen sehr subjektiv sind und nicht immer mit den tatsächlichen Studieninhalten oder Zielsetzungen des Studiums übereinstimmen müssen. Dem könnte beispielsweise durch eine höhere Transparenz der Studienstrukturen entgegengewirkt werden.

Die Ergebnisse dieser Arbeit unterliegen zudem gewissen Limitationen. So wurde die lehramtspezifische Perspektive im Interviewleitfaden zwar durch eine abschließende Impulsfrage explizit adressiert, jedoch nicht systematisch in den gesamten Interviewablauf integriert, da der gleiche Leitfaden im Projekt auch zur Analyse der Belastungsquellen für Physikhauptfachstudierende herangezogen wurde. Diese Ausrichtung könnte zu einer geringeren und oberflächlicheren Thematisierung von Studiengangsspezifika geführt haben als in einem Interviewleitfaden, der dieses Thema explizit zum Gegenstand macht. Zudem ist im Sinne des Survivorship Bias zu beachten, dass die Befragten bis auf eine Person, die das Fach Physik zum Interviewzeitpunkt bereits gewechselt hatte, das erste Studienjahr erfolgreich durchlaufen hatten und somit die Perspektiven von Studienabbrecher:innen bzw. Fachwechsler:innen kaum berücksichtigt werden konnten, obwohl diese möglicherweise ein anderes Belastungserleben aufweisen.

6 Fazit und Ausblick

Diese Arbeit untersuchte das Belastungserleben von Physiklehramtsstudierenden und entwickelte daraufhin induktiv ein Kategoriensystem, das sieben für das Lehramt spezifische Belastungsquellen und sechs damit verknüpfte Wünsche für Unterstützungsmaßnahmen bzw. studienstrukturelle Veränderungen umfasst. Die Ergebnisse zeigen, dass insbesondere die mangelnde Passung zwischen Studium und späterem Beruf, hohe fachliche Anforderungen sowie die organisatorische Vereinbarkeit der Studienfächer als zentrale lehramtspezifische Belastungsquellen empfunden werden. Gleichzeitig wurden Veränderungsvorschläge geäußert, etwa eine stärkere schulische Orientierung der Studieninhalte, differenzierte curriculare Strukturen und der Wunsch nach mehr Wertschätzung von Lehramtsstudierenden.

Die Erkenntnisse bieten Ansatzpunkte für zukünftige Forschung, etwa durch Untersuchungen an anderen Hochschulstandorten oder längsschnittliche Erhebungen zur Entwicklung des Belastungserlebens im Studienverlauf. Perspektivisch könnte dabei insbesondere gezielter die Perspektive der Studienabbre-

cher:innen fokussiert werden, um die einem Studienabbruch zugrundeliegenden Entscheidungen besser zu verstehen.

Aus praktischer Sicht zeigen sich mehrere potenzielle Ansatzpunkte zur Verbesserung der Studienbedingungen: Dazu zählen beispielsweise eine stärkere Verzahnung zwischen der Fachphysik und Fachdidaktik, die Einführung weiterer lehramtsspezifischer Lehrformate oder die bessere Koordination zwischen den Lehramtsstudiengängen. Solche Maßnahmen könnten das Belastungserleben von Lehramtsstudierenden gezielt verringern und das Studiererleben im Physiklehramtsstudium nachhaltig verbessern.

7 Literatur

- Albrecht, A. (2011). *Längsschnittstudie zur Identifikation von Risikofaktoren für einen erfolgreichen Studieneinstieg in das Fach Physik* [Dissertation, Freie Universität Berlin]. <http://dx.doi.org/10.17169/refubium-8615>
- Düchs, G., & Runge, E. (2024). Fewer Students – more English: Statistiken zum Physikstudium in Deutschland 2024. *Physik Journal*, 23(9), 29–35.
- Heublein, U., Hutzsch, C., & Schmelzer, R. (2022). *Die Entwicklung der Studienabbruchquoten in Deutschland*. (DZHW Brief 05|2022). Hannover: DZHW. https://doi.org/10.34878/2022.05.dzhw_brief
- Holmegaard, H. T., Madsen, L. M., & Ulriksen, L. (2014). A journey of negotiation and belonging: understanding students' transitions to science and engineering in higher education. *Cultural Studies of Science Education*, 9(3), 755-786. <https://doi.org/10.1007/s11422-013-9542-3>
- Klemm, K. (2020). *Lehrkräftemangel in den MINT-Fächern: Kein Ende in Sicht. Zur Bedarfs- und Angebotsentwicklung in den allgemeinbildenden Schulen der Sekundarstufen I und II am Beispiel Nordrhein-Westfalens*. <https://www.telekom-stiftung.de/sites/default/files/mint-lehrkraeftebedarf-2020-ergebnisbericht.pdf>
- Lahme, S., Neuhaus, J., Sandoval, S., & Klein, P. (2024a). Belastungserleben in der Studieneingangsphase: Eine Interviewstudie. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.25829.20963>
- Lahme, S. Z., Cirkel, J. O., Hahn, L., Hofmann, J., Neuhaus, J., Scheider, S., Klein, P. (2024b). Enrollment to exams: Perceived stress dynamics among first-year physics students. *Physical Review Physics Education Research*, 20(2), 020127. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.20.020127>
- Landis, J. R., & Koch, G. G. (1977). The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. *Biometrics*, 33(1), 159–174. <https://doi.org/10.2307/2529310>
- Lüders, M., Joußen, R., & Heinke, H. (2020). Unterstützungsmöglichkeiten in der Studieneingangsphase im lehramtsbezogenen Bachelorstudiengang Physik. In: *PhyDid-B. Didaktik der Physik – Beiträge zur virtuellen DPG-Frühjahrstagung 2020*, 113–118. <https://ojs.dpg-physik.de/index.php/phydid-b/article/view/1078>
- Mayring, P. (2015). *Qualitative Inhaltsanalyse: Grundlagen und Techniken* (12. Aufl.). Beltz Pädagogik.
- Schwedler, S. (2017). Was überfordert Chemiestudierende zu Studienbeginn? *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 23(1), 165–179. <https://doi.org/10.1007/s40573-017-0064-5>
- Ständige Wissenschaftliche Kommission der Kultusministerkonferenz (SWK) (2023). *Lehrkräftegewinnung und Lehrkräftebildung für einen hochwertigen Unterricht: Gutachten der Ständigen Wissenschaftlichen Kommission der Kultusministerkonferenz*. <https://www.swk-bildung.org/content/uploads/2024/02/SWK-2023-Gutachten-Lehrkraeftebildung.pdf>
- Woitzik, A., Mecke, K., & Düchs, G. (2023). *Das Lehramtsstudium Physik in Deutschland: Eine Studie der Deutschen Physikalischen Gesellschaft e.V.* https://www.dpg-physik.de/veroeffentlichungen/publikationen/studien-der-dpg/pix-studien/dpg-studie_das_lehramtsstudium_physik_in_deutschland.pdf

Danksagung

Wir danken der Zentralen Wissenschaftlichen Einrichtung für Lehrer*innenbildung (ZEWIL) der Georg-August-Universität Göttingen für die finanzielle Unterstützung dieses Vorhabens. Ebenso danken wir unseren studentischen Hilfskräften Laura Pflügl und Stine Gerlach für ihre Unterstützung bei der Datenaufbereitung und beim Interrating.

Author contributions according to CRediT

Pascal Klein: Supervision; Writing – review & editing (supporting). Simon Z. Lahme: Conceptualization (equal); Formal Analysis (supporting); Funding acquisition; Investigation (equal); Methodology (equal); Project administration; Validation (supporting); Visualization (supporting); Writing – review & editing (equal). Josefine Neuhaus: Conceptualization (equal); Formal Analysis (supporting); Investigation (equal); Methodology (equal); Writing – review & editing (equal). Deniz C. Senel: Conceptualization (equal); Data Curation; Formal Analysis (lead); Validation (lead); Visualization (lead); Writing – original draft; Writing – review & editing (equal).

Chunkingprozesse beim Lesen und Schreiben von Formeln

Josefine Neuhaus*, Pascal Klein*, Andreas Müller⁺

*Georg-August-Universität Göttingen, Physik und ihre Didaktik, Friedrich-Hund-Platz 1, 37077 Göttingen,

⁺Université de Genève, Department of Physics, Boulevard du Pont-d'Arve 40a, 1211 Genève, Schweiz
josefine.neuhaus@uni-goettingen.de

Kurzfassung

Chunking beschreibt eine kognitive Strategie, bei der Informationen in sinnhafte Einheiten, sogenannte Chunks zusammengefasst werden. Diese Strategie zur Prozessierung von Informationen ermöglicht eine Erweiterung der Kapazitäten des Arbeitsgedächtnisses, da mehr bits an Informationen verarbeitet werden können, was sich beispielsweise in einem schnelleren Erfassen eines Sinnzusammenhangs äußern kann.

In unterschiedlichen Disziplinen konnte gezeigt werden, dass hierbei die Größe einzelner Chunks mit zunehmender Expertise anwächst und von der Länge und der Vertrautheit des Inhalts abhängt. Das in diesem Beitrag vorgestellte Konzept einer Studie stellt die Frage nach der Übertragbarkeit dieser Erkenntnisse auf den Kontext physikalischer Formeln. Dabei wird untersucht, ob und wie sich Chunking-Prozesse im Leseprozess (mittels Eye-Tracking) und im handschriftlichen Schreibprozess physikalischer Formeln äußert. Dieser Beitrag gibt einen Einblick in das Studiendesign und erste Analysen der handschriftlichen Reproduktionen der Proband:innen. Eine mit der allgemeinen und formelspezifischen Expertise ansteigende Fähigkeit größere Anteile der gezeigten Formeln zu reproduzieren kann hierbei als erster Indikator für das Auftreten von Chunking im Kontext von physikalischen Formeln ausgemacht werden.

1. Einleitung

Mit Hilfe von Formeln lassen sich in vielen Kontexten Zusammenhänge in einer symbolisch basierten Weise beschreiben. In der Physik stellen Formeln eine gängige Ausdrucksform dar, um Abhängigkeiten darzustellen, Gesetzmäßigkeiten zu fassen und neue Konzepte zu entwickeln. Das Verständnis der dargestellten Zusammenhänge und Erarbeiten hintergründiger Konzepte, sowie das Arbeiten mit Formeln zur Bearbeitung von Fragestellungen und Treffen von Vorhersagen, stellen Kernkompetenzen dar, die im Physikstudium erlernt werden. Jedem tieferehenden Verständnis liegt die visuelle oder haptische Wahrnehmung des Gegenstands zugrunde. Wie „funktionierte“ diese Wahrnehmung bei Formeln? Wie lesen Menschen Formeln? Wie verändert sich die Wahrnehmung mit einer vermehrten Auseinandersetzung mit dieser Form der symbolischen Sprache? Diese Prozesse der Wahrnehmung und kognitiven Verarbeitung von Formeln im Sinne des Wahrnehmens einer Symbolfolge besser zu verstehen, visiert die hier vorgestellte Studie an.

Symbolische/ alphabetische Sprachen bilden die Basis für viele Sprachsysteme: Worte werden hierbei aus festgeschriebenen Kombinationen von Symbolelementen zusammengesetzt, und unter Beachtung grammatikalischer Regeln werden hieraus Sätze gebildet. Das Lesen dieser Form alphabetischer Sprache wurde bisher unter Beachtung diverser Fragestellungen – beispielsweise nach dem Einfluss der Worthäufigkeit oder des Sichtfensters des gezeigten Textes – beleuchtet (Alamargot et al., 2010; Bonin et

al., 2015; Cheng & van Genuchten, 2018). Doch Formeln heben sich sowohl von ihrer semantischen, als auch von ihrer syntaktischen Natur von dieser Form der symbolischen Sprache ab. Zum einen stehen einige der Symbolelemente in Formeln in stärkerer Weise stellvertretend für physikalische Größen. Ein einzelnes Element in einer Formel kann also bereits in ein Wort übersetzt werden, beispielsweise kann ein „E“ für „Energie“ stehen. Diese Übersetzung ist nicht eindeutig, sondern kann vom physikalischen Kontext und von Konventionen abhängen. Zum anderen unterliegen Formeln zwar mathematischen Regularien, die einen syntaktischen Rahmen darstellen, die Formelelemente können aber innerhalb dieses Rahmens auf sehr unterschiedliche Arten zusammengestellt werden. Daher kann die oberflächliche Struktur sich stark unterscheiden, obwohl der physikalische Aussagegehalt bei derartigen Transformationen unberührt bleibt. Auch wenn es keine eindeutige Rechtschreibung, sondern eine gewisse Flexibilität gibt, die auch von Studierenden in dieser Weise gesehen wird (Strahl, 2015), existierten konventionelle Schreibweisen, wie sie häufig in Lehrbüchern auftauchen und sich in der Regel an der Struktur Konstante – Parameter – Variable orientieren (Moelter & Jackson, 2012). Welche Rolle spielt diese Konvention für unsere Wahrnehmung von Formeln, und welche Rolle spielt andererseits die Flexibilität dieser symbolischen Sprache? Wie, in welchen Einheiten und mit welchen inhaltlichen Verknüpfungen, sind Formeln im Langzeitgedächtnis abgespeichert und werden bei der Lektüre von Formeln aktiviert?

Die hier vorgestellte Studie versucht einen ersten Einblick in die Wahrnehmung und Verarbeitung von Formeln zu gewinnen und der Frage nachzugehen, welche Rolle Chunking-Prozesse hierbei einnehmen. Im Folgenden wird das verwendete Studiendesign dargestellt und es werden erste Einblicke in die handschriftlichen Bearbeitungen der Proband:innen und deren Auswertung gewährt.

2. Theoretischer Hintergrund

2.1. Was ist Chunking?

Der Terminus „Chunking“ beschreibt das Zusammenfassen von kleineren Einheiten zu einer größeren Einheit bzw. das Unterteilen eines längeren Ausdrucks in kleinere Abschnitte, die als „Chunks“ bezeichnet werden (Miller, 1956).

Hierbei wird unterschieden zwischen einem bewussten/deliberativen Chunking, das beispielsweise explizit als Mnemotechnik genutzt wird, um Inhalte zu strukturieren und memorieren zu können, und einem automatischen Chunking, das sich durch die Vertrautheit mit einem Kontext entwickelt (Gobet et al., 2016).

Bei automatischem Chunking ist neben dem in seiner Verarbeitungsleistung limitierten Arbeitsgedächtnis das Langzeitgedächtnis involviert. „Chunks“ werden hierbei als Einheiten angenommen, die in vergleichbarer Weise im Langzeitgedächtnis abgespeichert sind. Auf diese Weise, so die Theorie, werden Kapazitäten im Arbeitsgedächtnis freigesetzt, da nicht die einzelnen Elemente innerhalb eines Chunks abgespeichert/ verarbeitet werden müssen, sondern ein Pointer, der auf den Speicherort innerhalb des Langzeitgedächtnisses zeigt (Gobet et al., 2001).

Diesen Gedanken aufnehmend werden in der Leseforschung (symbolbasierte Sprachen) mit der Wahrnehmung von Worten und Texten unterschiedliche kognitive Prozesse verbunden. Es wird unterschieden zwischen dem langsamen Prozess des Graphem-zu-Phonem-Abgleichs und dem schnelleren Prozess, bei dem ein Abgleich des Gesehenen mit dem orthographischen Gedächtnis geschieht (Coltheart et al., 1993). Als Elemente des orthographischen Gedächtnisses können sowohl Silben, als auch Worte oder sogar Wortkombinationen vorliegen.

Während bei bewusstem Chunking, bei dem Elemente willentlich zusammengefasst und Chunks daher benannt werden können, geht man davon aus, dass Chunks bei automatischem Chunking-Prozessen schwieriger zugänglich sind und über indirekte Beobachtungsmethoden (Eyetracking, Pausenanalysen, ...) zugänglich gemacht werden müssen (Gobet et al., 2016; Gilchrist, 2015).

2.2. Erkenntnisse aus dem Schachspiel

Erste systematische Untersuchungen zu expertiseabhängigem Chunking wurde im Bereich des Schachspiels vorgenommen (Chase & Simon, 1973). Basierend auf ELO-Scores ist hier eine einfache

Rangzuordnung der Expertise möglich. Untersuchungen haben hierbei unter anderem die Reproduktionsleistung beim zeitverzögerten Nachstellen einer gezeigten Anordnung von Spielfiguren untersucht. Die Leistungen bei derartigen Aufgaben waren hierbei stark von der Expertise der Personen abhängig, was als Resultat von Chunking interpretiert wird. Mit zunehmender Expertise zeigt sich also das Verhalten einer strukturierten Einteilung der Spielfiguren.

Gobet und Simon (2000) zeigten, dass sich expertiseabhängige Unterschiede für kurze Präsentationszeiten noch verstärken, dass Chunking sich also auch in einer schnelleren Auffassung bekannter Zusammenhänge äußert. Während sich die Reproduktionsergebnisse bei Lai:innen verbesserten, wenn ihnen die Ausgangssituation länger gezeigt wurde, waren Schachmeister:innen in der Lage die Aufstellung innerhalb weniger Sekunden zu erfassen und längere Betrachtungszeiten veränderten das Reproduktionsergebnis nur marginal. Mit höherer Expertise können somit größere Chunks schneller erfasst werden.

Weiterhin zeigte sich in mehreren Studien, dass Unterschiede größer sind, wenn die zu reproduzierende Situation einem regelkonformen Spiel entnommen ist. Diese Beobachtung ist insbesondere dadurch bedingt, dass die Reproduktionsraten von Personen hoher Expertise sich zwischen dem Fall einer regelkonformen und einer zufälligen Aufstellung der Figuren auf dem Schachbrett unterscheiden.

Die Studien zum Schachspiel zeigen eindrücklich, dass Chunking ein domänenspezifischer Prozess ist, der nicht allein von genereller Vertrautheit mit dem Spiel, sondern in entscheidender Weise von der Vertrautheit mit konkreten Mustern und Spielsituationen abhängt. Diese Erkenntnis legt nahe, dass sich auch im Bereich der Formelverarbeitung in der Physik expertiseabhängige Chunking-Prozesse zeigen könnten – ein Zusammenhang, dem sich die vorliegende Studie widmet.

2.3. Chunking im Kontext mit Formeln

Erste Studien legen nahe, dass beim Umgang mit domänenspezifischen Formeln Chunking-Prozesse ablaufen. Im Folgenden wird auf einzelne Studien eingegangen, die sich mit automatischem Chunking bei Formeln auseinandersetzen und den Prozess aus unterschiedlichen Blickwinkeln betrachten.

Erste Ansätze zur Untersuchung der kontextspezifischen Wahrnehmung von Formeln finden sich bei Rebert (1932). In einer Eye-Tracking-Studie zum Lesen von Formeln wurde beobachtet, dass die Anzahl an Fixationen und deren Länge sich reziprok zur Expertise verhält. Expert:innen, so formuliert es Rebert, tendieren dazu konzeptuelle Formeln, die nicht explizit einer analytischen Untersuchung bedürfen, die also nicht beispielsweise mit einer Aufgabe zur (mental) Manipulation verbunden sind, eher als eine Einheit zu lesen. Der Begriff „Chunking“ wird in diesem Kontext noch nicht verwendet. Die Beobachtung

einer expertisearabhängigen Veränderung der Aufmerksamkeitsverteilung hin zu einer geringeren Anzahl an Fixationen kann allerdings als Indiz für die Ausbildung von Chunks gelten. Sie deutet darauf hin, dass nicht jedes Element der Formel explizit gelesen wird, sondern dass Formeln in nicht näher bestimmten Einheiten erfasst werden.

In einer Studie aus dem Jahr 2013 erkennen Zhilin & Tkachuk expertisearabhängige Chunking-Prozesse im Kontext chemischer Reaktionsgleichungen. Ähnlich wie bei physikalischen Gleichungen handelt es sich auch hierbei um eine symbolische Formulierung eines fachspezifischen Zusammenhangs, wobei die Bedeutung der Formel über die Bedeutung der einzelnen Formelelemente hinausgeht, und die Syntax Variationen erlaubt. Die Autor:innen untersuchten, wie gut Schüler:innen unterschiedlicher chemiespezifischer Expertise – deklariert basierend auf der Jahrgangsstufe und damit dem Maß an Beschäftigung mit dem Thema im Unterricht – reale und zufällig durcheinandergewürfelte Reaktionsgleichungen nach einer Expositionszeit von 30 s reproduzieren können. Einerseits beobachteten die Autor:innen bei realen Gleichungen, dass die Reproduktionsrate mit der Expertise zunahm; diese Unterschiede nivellierten sich jedoch bei zufälligen Anordnungen der Elemente. Andererseits beobachteten sie eine sequentielle Vorgehensweise bei Personen niedriger Expertise, während bei Personen mit höherer Expertise einige zusammenhängende Elemente ausgemacht werden konnten. Diese Beobachtungen deuten laut den Autor:innen auf Chunking-Mechanismen im Umgang mit chemischen Formeln hin. Um die genaue Form der Chunking-Prozesse, die Art von Chunks und deren Ausbildung zu analysieren, bedarf es zusätzlicher (prozeduraler) Untersuchungen.

Eine prozedurale Herangehensweise verfolgt die Arbeitsgruppe um P. Cheng, wobei nicht die Erforschung von Chunking, sondern die Bestimmung der Expertise im Zusammenhang mit mathematischen Formeln im Vordergrund steht. Hierbei bilden postulierte Chunking-Prozesse die Grundlage der Einteilung (Cheng & Rojas-Anaya, 2007; Cheng, 2014; Cheng, 2015). Basierend auf der Annahme, dass im Schreibprozess die Pausen innerhalb von Chunks kürzer sind, als Pausen zwischen Chunks, fanden sie unterschiedliche Pausenmaße, die sich als geeignet zur Diskriminierung der Expertiseniveaus zeigten. Die durchschnittliche Pausenlänge bzw. die Anzahl langer Pausen beim Abschreiben mathematischer Formeln zeigte sich als reziprok zur Expertise, was einen indirekten Beleg für expertisearabhängiges Chunking darstellt – da Expert:innen größere Chunks nutzen und ihr Schreibprozess mehr kürzere Intra-, als längere Interchunk-Pausen enthält.

Insgesamt zeigen die Beobachtungen der dargelegten Studien erste indirekte Hinweise auf Chunking-Prozesse im Umgang mit Formeln in unterschiedlichen Kontexten. Eine Fokussierung auf physikalische Formeln und den Zusammenhang zwischen einer

allgemeinen und einer Expertise für den expliziten Untersuchungsgegenstand, ist allerdings bisher kein Teil der Forschung gewesen. Darüber hinaus lassen bisherige Forschungsarbeiten beispielsweise Fragen nach der Natur von Chunks, deren Ausbildung, Veränderung und Intersubjektivität offen.

In diesem Beitrag wird die Konzeption einer Studie vorgestellt, die zu näheren Einsichten bezüglich der genannten offenen Punkte verhelfen soll. Zudem werden erste Ergebnisse zum Zusammenhang zwischen der allgemeineren fachspezifischen bzw. einer konkreteren gegenstandsspezifischen Expertise und der Reproduktionsrate im Kontext physikalischer Formeln skizziert.

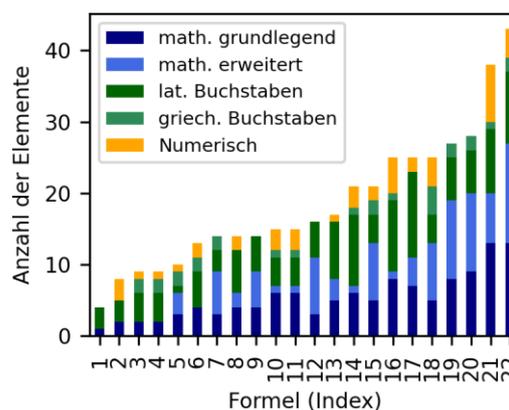


Abb. 1: Anzahl unterschiedlicher Elemente in den Formeln (hier durchnummeriert), kategorisiert in fünf unterschiedliche Gruppen nach mathematischen, alphabetischen (lateinisch bzw. griechisch) und numerischen Elementen. „Mathematisch grundlegende Elemente“ umfassen arithmetische Grundoperationen und Klammern; alle weiteren mathematischen Symbole (bspw. Wurzeln, Integralzeichen, Ableitungen) wurden als „erweitert“ klassifiziert. (eigene Abbildung)

3. Studiendesign

An die im vorangegangenen Kapitel dargestellten Studien anschließend wird im Folgenden ein Studienkonzept vorgestellt, mit dem das Lese- und Schreibverhalten von Personen mit unterschiedlichem Erfahrungsgrad im Bereich der universitären Physik in Bezug auf ihr Lese- und Schreibverhalten bei physikalischen Formeln untersucht werden soll. Das Ziel besteht darin, aus einer Kombination unterschiedlicher prozeduraler Daten, sowie der Schreibergebnisse Rückschlüsse auf die Prozesse des Chunkings ziehen zu können.

3.1. Auswahl und Charakterisierung der Formeln

Für die Studie wurden Formeln aus den Kontexten Mechanik, Fluidodynamik, Elektrostatik und -dynamik ausgewählt. Diese Themenkomplexe werden im Rahmen der Experimentalphysikvorlesungen in Göttingen in den ersten beiden Semestern in unterschiedlicher Ausführlichkeit thematisiert, einzelne der ausgewählten Formeln werden auch in der Schule behandelt. Diese Auswahl ermöglicht durch das Messen zu

mehreren Messzeitpunkten eine potentielle Entwicklung innerhalb eines kurzen Zeitraums (1-2 Fachsemester), bedingt durch die explizite thematische Auseinandersetzung mit den Formeln, analysieren zu können.

Die Formeln wurden so ausgewählt, dass sie unterschiedliche Längen und unterschiedliche Anzahlen an Variablen, Operatoren und strukturgebenden Elementen enthalten.

Als Länge der Formel wurde hierbei die Anzahl ihrer Elemente gewertet. Dabei wurden sowohl Variablen, als auch mathematische Operatoren, Indizes und Vektorpfeile als einzelne Elemente gezählt. Die mit vier Elementen kürzeste Formel war hierbei das Weg-Zeit-Gesetz

$$s = vt, \quad \{1\}$$

die mit 43 Elementen längste Formel war das Biot-Savart-Gesetz in der Form

$$\vec{B}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int d^3r' \vec{j}(\vec{r}') \times \frac{(\vec{r}-\vec{r}')}{|\vec{r}-\vec{r}'|^3}. \quad \{2\}$$

Auch die Komplexität der einzelnen Formelelemente war in den Formeln unterschiedlich. Während einzelne Formeln nur arithmetische Operatoren enthielten, die aus dem Schulkontext bekannt sein sollten, enthielten andere Formeln beispielsweise partielle Ableitungen, Vektoren, Kreuzprodukte oder Vektoroperatoren. Zudem enthielten einige Formeln ausschließlich lateinische, andere zudem griechische Buchstaben.

Die Diversität der Länge und Zusammensetzung der insgesamt 22 Formeln ist in Abbildung 1 dargestellt. Die Anzahl der Elemente ist hierbei kategorisiert nach mathematischen, alphabetischen und numerischen Elementen. Die mathematischen Elemente sind noch einmal unterteilt in „grundlegende“ (arithmetische Grundoperatoren und Klammern) und „erweiterte“ Elemente. Die alphabetischen Elemente sind in lateinische und griechische Buchstaben unterteilt.

3.2. Modifikationen von Formeln

Aus dem Bereich des Schachspiels ist bekannt, dass eine zufällige Umsortierung von Figuren auf dem Schachfeld die Reproduktionsrate bei zeitverzögerten Reproduktionsaufgaben (delayed copy task), insbesondere bei Menschen mit hoher Expertise, verschlechtert, da größere Chunks hierbei aufgebrochen werden. In Bezug auf Formeln kann ebenfalls eine zufällige Anordnung der Elemente gewählt werden, wodurch die resultierende Formel syntaktisch nicht mehr legitim, hierdurch aber auch physikalisch bedeutungslos wird. Aufgrund der nicht-linearen Struktur von Formeln – im Gegensatz zu Worten ist die Reihenfolge der Symbole innerhalb einer Formel nicht eindeutig festgelegt – und mathematischer Kommutationsregeln ist es aber auch möglich die Elemente so umzusortieren, dass die dargestellte Form von der „Standardform“ (Moelter & Jackson, 2012; Strahl, 2010) abweicht und dennoch seine physikalische Bedeutung beibehält. In dieser Studie

wurden die Kommutativität der Addition und Multiplikation ausgenutzt, 5 der gezeigten Formeln wurden sowohl in einer „Standardform“, als auch in einer abgewandelten Form präsentiert, wobei die Präsentationsreihenfolge variiert wurde. Hierbei wurde die Oberflächenstruktur in unterschiedlichem Ausmaß variiert, um auch hierdurch einen Einblick in die Struktur von Chunks in physikalischen Formeln gewinnen zu können und das Zusammenspiel von Oberflächenstruktur, Wiedererkennung und physikalischem Verständnis zu untersuchen. Während bei einer Gleichung nur die Reihenfolge der Summanden variiert wurde, wodurch eine Oberflächenstruktur der Formel weiterhin erkennbar war, wurde bei anderen Formeln die Kommutativität der Multiplikation genutzt, wodurch Formeln sich beispielsweise durch das Wegfallen von Klammern oder Hinzukommen von Brüchen auf einer oberflächlichen Struktur veränderten. In der Klassifizierung der Formeln nach Abbildung 1 können sich die Formelpaare aufgrund dieser Variationen auch unterscheiden.

3.3. Studiendesign

Vergleichbar zu vorangegangenen Studien aus dem Bereich der Chunking-Forschung (Gobet & Simon, 2000; Zhilin & Tkachuk, 2013) bildeten zeitverzögerte Reproduktionsaufgaben (delayed/retarded copy tasks) den Hauptteil der Studie. Den Proband:innen wurde zunächst eine Formel auf einem Bildschirm angezeigt, die sie „zügig und effizient“ lesen sollten. Die Formeln waren jeweils nur wenige Sekunden sichtbar, wobei die Zeitspanne abhängig von der Länge der Formel zwischen 4 und 13 Sekunden variierte. Basierend auf Pilotierungen wurde die Zeit so gewählt, dass Personen unterschiedlicher Expertise die Formel vollständig lesen konnten. Eine Begrenzung auf wenige Sekunden und die Aufgabenformulierung sollten das explizite Ausbilden von Chunks und bewusste Memorierung, soweit möglich, unterbinden. (Gobet et al., 2001) Proband:innen konnten die Lesezeit selbstgesteuert verkürzen, von dieser Option wurde aber nur in wenigen Einzelfällen Gebrauch gemacht. Um die Aufmerksamkeit auf den Bildschirnmittelpunkt zu richten und somit vergleichbare Startbedingungen für den Leseprozess zu ermöglichen, wurde ein Fixationskreuz angezeigt, bevor die Formel sichtbar war. Der Leseprozess wurde mit Eyetracking aufgezeichnet (Tobii Pro Fusion).

Im direkten Anschluss wurden die Proband:innen gebeten alles aufzuschreiben, was sie von der gezeigten Formel erinnern. Um hierbei den Fokus auf der kurzzeitigen Erinnerung zu legen und Korrekturen des Geschriebenen basierend beispielsweise auf Überlegungen zu physikalischen Zusammenhängen zu minimieren, wurde hierbei eine zeitliche Begrenzung von 60 Sekunden gewählt. Die tatsächlich genutzte Schreibzeit war in der Regel kürzer.

Abschließend wurde die Vertrautheit mit den Formeln in den Dimensionen „Sehen“, „Manipulieren/Rechnen“, „Benennen“ und „Verstehen“ abgefragt.

(Zheng, 2024) Während die ersten beiden Dimensionen auf fünfstufigen Skalen („noch nie“ – „selten“ – „manchmal“ – „häufig“ – „regelmäßig“) abgefragt wurden, wurden die beiden letzten Dimensionen in offenen Fragen thematisiert: „Wie wird die Formel bezeichnet? Was ist der Name der Formel?“, „Was ist die physikalische Bedeutung der Formel?“. Insbesondere die letzten beiden Fragen dienten nicht nur zur Einschätzung der Vertrautheit und formelspezifischen Expertise, sondern sie sollten ein intentionales, verstehendes Lesen und somit eine bewusstere Verknüpfung mit physikalischen Sachinhalten provozieren.

Insgesamt wurden den Proband:innen neben zwei Beispielaufgaben 22 Formeln (17 in „Standardform“ und 5 „umsortierte“) gezeigt.

Dem Hauptteil vorausgehend beurteilten Proband:innen eine Liste der in den Formeln vorkommenden mathematischen und griechischen Symbole nach ihrer subjektiven Vertrautheit. Auf diese Weise konnte sichergestellt werden, dass alle Proband:innen auch fachspezifische Symbole in den Formeln mindestens einmal gesehen hatten. Darüber hinaus wurde vor Beginn der Studie mit einem doppelten Aufschreiben des Namens „Albert Einstein“ eine Schriftprobe zur Einschätzung des individuellen Schreibverhaltens genommen.

Im Anschluss an den Hauptteil der Studie wurden demographische Angaben erhoben und die Kapazität des temporären Arbeitsgedächtnisses mit Hilfe eines digit span Test abgeschätzt. Der Test wurde jeweils als „forward“- und „backward“-Test durchgeführt und es waren pro Zahlenfolgenlänge zwei Fehlversuche erlaubt (Sbordone et al., 2007).

3.4. Aufnahme von Schreibdaten

Zur Aufzeichnung der Schrift beim Kopieren der Formeln wurde ein Wacom-Tablet (Wacom Intuos 4) verwendet. Ein DIN A4-Papier mit vorgegebenen Linien wurde auf dem Tablet befestigt, um durch die Möglichkeit einen Kugelschreiber zu verwenden ein natürliches Schreibgefühl und die Sichtbarkeit des geschriebenen Textes zu ermöglichen. Die Stiftposition wird mittels Induktion erfasst, so kann neben der Position und der Geschwindigkeit beim Schreiben auch beispielsweise der Stiftdruck gemessen werden. Die erfassten Daten können direkt auf den Computer übertragen und visualisiert werden. Schriftbezogene Daten werden mit einer Frequenz von 60 Hz aufgenommen.

Zur Auswertung der Schriftdaten wurde die Software „OpenHandWrite“ (Simpson et al., 2021) verwendet. Diese ermöglicht eine Annotation handgeschriebener Daten und eine nachträgliche Analyse sowohl der Schriftergebnisse, als auch des Schreibprozesses und der -dynamiken.

3.5. Stichprobe

An der Studie nahmen 33 Proband:innen teil. Hiervon hatten 7 keine Erfahrungen mit universitärer Physik, sondern waren Studierende oder Angestellte anderer Fachrichtungen, 19 waren zum Zeitpunkt der Studie im ersten Semester des Physikstudiums und 7 hatten ihr Physikstudium bereits absolviert oder zumindest alle Pflichtveranstaltungen des Studiums erfolgreich abgeschlossen.

4. Einordnung der Expertise

Ein offizielles Maß, nach dem die Expertise angegeben werden kann, wie etwa der ELO-Score im Schachspiel oder das Handicap beim Golf, existiert in der Physik nicht. In dieser Studie wurde zwischen einer „allgemeinen“, erfahrungsbezogenen und einer „formelspezifischen“ Expertise unterschieden.

Erstere nimmt an, dass die physikspezifische Expertise mit der universitären Auseinandersetzung mit dem Themenkomplex zunimmt (Zhilin & Tkachuk, 2013). In dieser Sichtweise werden die Proband:innen basierend auf der Anzahl an Erfahrungsjahren im Kontext der universitären Physik als „Lai:innen“, „Noviz:innen“ und „Expert:innen“ deklariert. Es handelt sich folglich um eine prädeklarierte Einteilung der Proband:innen.

Zweitere bezieht sich auf den explizit in der Studie behandelten Kontext und basiert auf der Vertrautheit der Proband:innen mit den gezeigten Formeln. Die Vertrautheit wurde hierbei in den Dimensionen „Sehen“ und „Manipulieren“ auf einer 5-stufigen Skala und in der Dimension „Benennen“ in einem offenen Format abgefragt. Die Benennung der Formeln wurde mit 0/ 1/ 2 Punkten bewertet. Mit dieser Einteilung der Bewertung wurde beispielsweise unterschieden, ob Personen eine der Formeln als „eine der Maxwell-Gleichungen“, oder als „vierte Maxwellgleichung“/ „Ampèresches Gesetz“ identifizieren konnten. Es zeigte sich eine hohe Korrelation zwischen den unterschiedlichen mittleren Vertrautheitsdimensionen über alle Aufgaben hinweg ($r > 0.9$ für alle paarweisen Vergleiche), weshalb sie, gleichgewichtet, summativ zu einem „formelspezifischen“ Vertrautheitsmaß zusammengefasst werden können.

5. Bewertung der Schreibdaten

Bei den Reproduktionen der Formeln zeigten sich große Unterschiede, die auf sehr unterschiedliche Weise bewertet werden können. Neben dem Auswerten von Abstandsmaßen zwischen den Zahlenfolgen (bspw. Damerau-Abstand; Damerau, 1964) oder einer Bewertung auf mathematischer oder physikalischer Basis, ist als erste Annäherung an die Korrektheit der Reproduktion eine „naive“ Herangehensweise möglich.

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

Abb. 2: Links: Beispielsreproduktion, rechts: Ausgangsformel (Lorentz-Kraft). Obwohl in dieser Reproduktion die Kraft mit dem elektrischen Feld vertauscht wurden, die Formel also in der Form physikalisch nicht mehr plausibel ist, wurde in der naiven Bewertung lediglich 1 Punkt abgezogen, da ein Vektorpfeil fehlt. (eigene Abbildung)

In einer solchen „naiven“ Sichtweise auf die Reproduktionsergebnisse kann man zunächst im Sinne einer Positivzählung Ähnlichkeiten zwischen Ausgangs- und reproduzierter Formel auf der Elementebene vornehmen. Reproduzierte Formeln werden hierbei ausschließlich in Bezug darauf mit den Ausgangsformeln verglichen, welche Elemente in beiden Formeln vorhanden sind. In dieser Zählung vernachlässigen wir sowohl die Position der Elemente innerhalb der Formel (Reihenfolge der Elemente), als auch die Funktion, welche die Elemente innerhalb der Formel einnehmen (Argument, Index, Interpunktion, ...). Als „Naiv“ kann man diese Sichtweise bezeichnen, da hierbei kein Vorwissen beispielsweise über die korrekte mathematische oder physikalische Verwendung von Vektorpfeilen oder Indizes einfließt, sondern ein Abgleich auf einer visuellen Zeichenebene vorgenommen wird. Die semantische Bedeutung der reproduzierten Elemente fließt hierdurch bei der Bewertung ebenso wenig ein, wie zusätzlich durch Proband:innen vermeintlich erinnerte Elemente. Diese Bewertungsweise trifft noch keine Aussagen über den physikalischen Inhalt einer reproduzierten Aussage. Exemplarisch sind in Abbildungen 2-5 Reproduktionen unterschiedlicher Formeln dargestellt, anhand derer typische Abweichungen bei der Reproduktion gezeigt werden.

In Abbildung 2 ist die Reproduktion der Lorentz-Kraft gezeigt, wobei die Variablen für die resultierende Kraft und das elektrische Feld vertauscht wurden. Diese Gleichung ist physikalisch inkorrekt, auch mathematisch betrachtet fehlt ein Vektorpfeil über der linken Variablen, in der vorgestellten Bewertungsweise wird lediglich wegen des fehlenden Vektorpfeils ein Punkt abgezogen.

$$0 = x(t)\omega_0^2 + \ddot{x}(t)$$

Abb. 3: Links: Beispielsreproduktion, Rechts: Ausgangsformel (harmonischer Oszillator). Die Ausgangsformel hat 15 Elemente, nach der vorgestellten „naiven“ Bewertung wurden hiervon 9 korrekt reproduziert, obwohl zahlreiche Elemente nicht in ihrer korrekten Funktionsweise reproduziert wurden. (eigene Abbildung)

In Abbildung 3 ist beispielhaft eine Reproduktion der Gleichung eines harmonischen Oszillators gezeigt, wobei Variablen und Zahlen weitestgehend und in der richtigen Reihenfolge reproduziert wurden. Aufgrund fehlender mathematischer Operatoren und falscher

$$E = \frac{1}{2}mv^2$$

Abb. 4: Links: Beispielreproduktion, rechts: Ausgangsformel. Inhaltlich stimmen die Formeln überein, das in der Ausgangsformel enthaltene Element „1“ ist allerdings nicht reproduziert worden, weshalb in diesem Beispiel nur 7 der 8 Elemente als korrekt reproduziert gewertet werden. (eigene Abbildung)

Funktionszuordnung der Elemente ist die Reproduktion weder mathematisch noch physikalisch sinnvoll. Nur die Anzahl reproduzierter Elemente beachtend wurde diese Reproduktion mit 9 von 15 Punkten bewertet.

Diese „naive“ Bewertung bedingt andererseits, dass alternative Schreibweisen, die sowohl mathematisch, als auch physikalisch korrekt sind, schlechter bewertet werden. Hierdurch kann in Einzelfällen eine fachkompetente Reproduktion mit einer geringeren Punktzahl bewertet werden. Alternative Schreibweisen umfassen hierbei einerseits das Zusammenziehen von Termen (s. Abbildung 4) und andererseits das Verwenden äquivalenter Ausdrücke beispielsweise bei Exponentialfunktionen (s. Abbildung 5), bei der Notation partieller Ableitungen

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} \rightarrow \partial_t\right) \quad \{3\}$$

oder bei der Beschreibung von Volumenelementen

$$(d^3r \rightarrow d\vec{r}). \quad \{4\}$$

In allen diesen Fällen wurde für die alternative Notation nicht die volle Punktzahl vergeben, da nicht alle Elemente der ursprünglichen Schreibweise in der Reproduktion zu finden waren. Das Bewertungsschema geht daher mit einer systematisch schlechteren Bewertung von Personen mit höherer Expertise einher, die sich der mathematischen/physikalischen Äquivalenz der Ausdrücke bewusst sind.

$$f(v) = \sqrt{\frac{m}{2\pi kT}} e^{-\frac{mv^2}{2kT}}$$

Abb. 5: Oben: Beispielsreproduktion, unten: Ausgangsformel (Maxwell-Boltzmannsche Geschwindigkeitsverteilung). In der Reproduktion wurde eine alternative Schreibweise der Exponentialfunktion gewählt, wodurch das Element „e“ nicht als korrekt reproduziert gewertet wurde. (eigene Abbildung)

Aus dieser Bewertung ergibt sich eine formelspezifische Reproduktionsrate als Quotient der korrekt reproduzierten Elemente und der Gesamtanzahl an Elementen in einer Formel.

6. Ergebnisse zur Reproduktion von Formeln in Abhängigkeit der Expertise

In Bezug auf die allgemeine, erfahrungsbezogene Expertise unterscheiden sich die drei prädeklarierten Gruppen signifikant, wie eine ANOVA ($p = 0.001$) mit anschließenden paarweisen Vergleichen ($p < 0.01$; $d > 1.4$) zeigt. Während die Lai:innen im Durchschnitt (44 ± 3)% der Elemente korrekt reproduzieren konnten, waren es bei den 19 Noviz:innen (71 ± 2)% und bei den 7 Expert:innen (82 ± 3)%, wenn man alle gezeigten Formeln in den Blick nimmt. Mit der Erfahrung nimmt die Anzahl reproduzierter Elemente also deutlich zu.

Auch die gegenstandsspezifische Expertise korreliert stark positiv mit der Reproduktionsrate. Die Spearman-Korrelation zwischen der Reproduktionsrate und der gegenstandsspezifischen Expertise beträgt $\rho = 0.85$ ($p < 0.001$). Je vertrauter eine Person mit einer bestimmten Formel ist, desto eher ist sie in der Lage sie korrekt zu reproduzieren. Bei den ausgewählten Formeln, der Stichprobe und der Bewertung zeigt sich jedoch eine Sättigung. Eine Beschreibung der Daten mit einer Exponentialfunktion zeigt ein asymptotisches Verhalten an eine Reproduktionsrate von 88.5 %.

7. Fazit und Ausblick

Das dargestellte Studienkonzept zielt darauf ab Einblicke in Chunking-Prozesse im Umgang mit physikalischen Formeln zu erhalten. Aus Analysen prozeduraler und von Ergebnis-Daten sowohl über den Lese-, als auch dem Schreibprozess zielt die Studie darauf ab Einblicke aus unterschiedlichen Perspektiven über die Existenz und die Art und Weise von perzeptuellem, automatischem Chunking zu gewinnen.

Eine erste Analyse der Schriftdaten deutet, im Einklang mit vorangegangenen Forschungsarbeiten zum Umgang mit Formeln (Zhilin & Tkachuk, 2013), an, dass expertiseabhängiges Chunking im Zusammenhang mit physikalischen Formeln von Bedeutung ist. In Abhängigkeit von der Expertise waren Proband:innen in der Lage einen größeren Anteil an Elementen einer Formel zu reproduzieren. Diese Beobachtung zeigt sich bereits bei der vorgestellten Herangehensweise zur Bewertung der Formeln, die aufgrund des Nicht-Beachtens mathematischer und physikalischer Aspekte (Funktion der Elemente) tendenziell zu einer besseren Bewertung von Personen mit geringerer Expertise führt, und einer Nicht-Wertung inhaltlich äquivalenter, alternativer Formulierungen, die tendenziell mit einer schlechteren Bewertung von Personen mit höherer Expertise einhergeht. Eine solche expertiseabhängige Performance bei Reproduktionsaufgaben deutet, unter der Prämisse einer endlichen Kapazität des Arbeitsgedächtnisses, auf unterschiedliche kognitive Verarbeitungsprozesse im Umgang mit dem Untersuchungsgegenstand hin. Durch das

Zusammenfassen in Untereinheiten und hiermit verbundene Verknüpfungen zum Langzeitgedächtnis, werden Kapazitäten des Arbeitsgedächtnisses anders ausgenutzt, daher dient der beobachtete erhöhte Reproduktionsanteil als indirekter Hinweis auf Chunking (Gilchrist, 2015).

Dieser erste Hinweis zieht zahlreiche weitere Fragen nach sich. Welche Rolle spielt die Identifikation von Formelelementen und das inhaltliche Verständnis von Formeln für den Erinnerungsprozess? Gibt es übereinstimmende Chunks zwischen Personen? Wie verändern sich diese Chunks über die Zeit? Diese Dynamiken und das Zusammenspiel zwischen Verständnis und Perzeption näher zu untersuchen ist Forschungsgegenstand weiterer Untersuchungen.

8. Literatur

- Alamargot, D., Plane, S., Lambert, E., & Chesnet, D. (2010). Using eye and pen movements to trace the development of writing expertise: Case studies of a 7th, 9th and 12th grader, graduate student, and professional writer. *Reading and Writing, 23*(7), 853–888. <https://doi.org/10.1007/s11145-009-9191-9>
- Bonin, P., Méot, A., Lagarrigue, A., & Roux, S. (2015). Written object naming, spelling to dictation, and immediate copying: Different tasks, different pathways? *Quarterly Journal of Experimental Psychology, 68*(7), 1268–1294. <https://doi.org/10.1080/17470218.2014.978877>
- Cheng, P. (2014). Copying equations to assess mathematical competence: An evaluation of pause measures using graphical protocol analysis. *Proceedings of the Annual Meeting of the Cognitive Science Society, 36*(36). <https://escholarship.org/uc/item/9jw9347s>
- Cheng, P. C.-H. (2015). Analyzing chunk pauses to measure mathematical competence: Copying equations using ‘centre-click’ interaction. *Proceedings of the Annual Meeting of the Cognitive Science Society, 37*(0).
- Cheng, P. C., & Rojas-Anaya, H. (2007). Measuring Mathematic Formula Writing Competence: An Application of Graphical Protocol Analysis. *Proceedings of the Annual Meeting of the Cognitive Science Society, 29*.
- Cheng, P. C.-H., & van Genuchten, E. (2018). Combinations of Simple Mechanisms Explain Diverse Strategies in the Freehand Writing of Memorized Sentences. *Cognitive Science, 42*(4), 1070–1109. <https://doi.org/10.1111/cogs.12606>
- Coltheart, M., Curtis, B., Atkins, P., & Haller, M. (1993). Models of Reading Aloud: Dual-Route and Parallel-Distributed-Processing Approaches. *Psychological Review, 100*(4), 589–608.
- Damerau, F. J. (1964). A technique for computer detection and correction of spelling errors.

- Commun. ACM, 7(3), 171–176.
<https://doi.org/10.1145/363958.363994>
- Gilchrist, A. L. (2015). How should we measure chunks? A continuing issue in chunking research and a way forward. *Frontiers in Psychology*, 6.
<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.01456>
- Gobet, F., Lane, P. C. R., Croker, S., Cheng, P. C.-H., Jones, G., Oliver, I., & Pine, J. M. (2001). Chunking mechanisms in human learning. *Trends in Cognitive Sciences*, 5(6), 236–243.
[https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(00\)01662-4](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(00)01662-4)
- Gobet, F., Lloyd-Kelly, M., & Lane, P. C. R. (2016). What’s in a Name? The Multiple Meanings of “Chunk” and “Chunking”. *Frontiers in Psychology*, 7.
<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.00102>
- Gobet, F., & Simon, H. A. (2000). Five Seconds or Sixty? Presentation Time in Expert Memory. *Cognitive Science*, 24(4), 651–682.
https://doi.org/10.1207/s15516709cog2404_4
- Miller, G. A. (1956). The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review*, 63(2), 81–97.
<https://doi.org/10.1037/h0043158>
- Moelter, M. J., & Jackson, M. (2012). Formulas in Physics Have a “Standard” Form. *The Physics Teacher*, 50(8), 472–474.
<https://doi.org/10.1119/1.4758146>
- Sbordone, R. J., Saul, R. E., & Purisch, A. D. (2007). *Neuropsychology for Psychologists, Health Care Professionals, and Attorneys* (3. Aufl.). CRC Press.
<https://doi.org/10.1201/9781420007138>
- Simpson, S., Nottbusch, G., & Torrance, M. (2021). *OpenHandWrite* <https://github.com/isolver/OpenHandWrite>
- Strahl, A., Grobe, J., & Müller, R. (2010). Was schreckt bei Formeln ab? - Untersuchung zur Darstellung von Formeln. *PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*. <https://ojs.dpg-physik.de/index.php/phydid-b/article/view/169>
- Zheng, W. (2024). Estimating word difficulty using stratified word familiarity. *Cogent Arts & Humanities*, 11(1).
<https://doi.org/10.1080/23311983.2024.2420467>
- Zhilin, D.M., & Tkachuk, L.E. (2013). Chunking in Chemistry. *International Journal of Physics and Chemistry Education*, 5(1), 39–56.
<https://doi.org/10.51724/ijpce.v5i1.73>

Ein interdisziplinäres Seminar für Lehramtsstudierende der Naturwissenschaften

Giulia Pantiri¹, Lea Mareike Burkhardt², Fatime Beka³, Thomas Wilhelm¹, Volker Wenzel²,
Arnim Lühken³, Dieter Katzenbach⁴

¹Institut für Didaktik der Physik, Universität Frankfurt, Max-von-Laue-Str. 1, 60438 Frankfurt a.M.

²Abteilung für Didaktik der Biowissenschaften, Uni Frankfurt, Max-von-Laue-Str. 13, 60438 Frankfurt a.M.

³Institut für Didaktik der Chemie, Universität Frankfurt, Max-von-Laue-Str. 7, 60438 Frankfurt a.M.

⁴Institut für Sonderpädagogik, Universität Frankfurt, Theodor-W.-Adorno-Platz 6D, 60323 Frankfurt a.M.

pantiri@physik.uni-frankfurt.de, l.burkhardt@bio.uni-frankfurt.de, beka@chemie.uni-frankfurt.de,
wilhelm@physik.uni-frankfurt.de, wenzel@bio.uni-frankfurt.de, luehken@chemie.uni-frankfurt.de,
d.katzenbach@em.uni-frankfurt.de

Kurzfassung

Im Projekt E²piMINT arbeiten Vertreter*innen aus den Fachdidaktiken Biologie, Chemie und Physik mit der Sonderpädagogik zusammen, um ein inklusives und interdisziplinäres MINT-Unterrichtskonzept für die Sekundarstufe I zu entwickeln, zu erproben und zu evaluieren. Dafür wurde jeweils ein Projekttag zum Thema „Farben“ und zum Thema „Kleben und Haften“ konzipiert, bei dem die Schüler*innen mit Experimentierkisten arbeiten und Experimente aus den drei Naturwissenschaften durchführen. Im Rahmen des Projekts wurde auch ein interdisziplinäres Seminar für Lehramtsstudierende entwickelt, das im Sommersemester 2024 stattfand.

Das Seminar war offen für alle Lehramtsstudierenden der Naturwissenschaften (Gymnasium, Haupt- und Realschule, Förderschule). Die Studierenden wurden in Arbeitsgruppen eingeteilt, die jeweils eine Experimentierkiste nach dem vorgestellten Konzept entwickelten. Dabei hatten sie die Möglichkeit, sich mit Personen aus anderen naturwissenschaftlichen Fächern auszutauschen und die in die Kisten integrierten inklusiven Merkmale (Experimentieranleitungen in einfacher Sprache, Hilfefkarten usw.) kennenzulernen. Während des Seminars nahmen sie auch an einer Lehrkräftefortbildung teil und erprobten die selbst entwickelten Experimentierkisten mit Schulklassen verschiedener Schulformen. Im Artikel werden das Seminar und die dabei entstandenen Materialien zum Thema „Kleben und Haften“ vorgestellt. Außerdem werden Vorteile, Grenzen und Verbesserungsmöglichkeiten des Seminars diskutiert.

1. Kontext des Seminars

1.1. Das Projekt E²piMINT

Das Design-Based-Research Projekt E²piMINT („Evidenzbasierte Entwicklung praxistauglicher inklusiver MINT Vermittlungskonzepte für die Schule“) stellt sich der Aufgabe, inklusive Vermittlungskonzepte für die Sekundarstufe I zu entwickeln, um Lehrkräften eine konkrete und praxistaugliche Unterstützung anzubieten (DBR Collective, 2003; Wilhelm & Hopf, 2014). Unter allen Herausforderungen der Inklusion fokussiert das Projekt vor allem auf die Anwesenheit von Schüler*innen mit sonderpädagogischem Förderbedarf in Regelschulen. Den größten Anteil haben dabei Schüler*innen mit den Förderschwerpunkten „Lernen“, „Sprache“ und „emotional und soziale Entwicklung“ (Kultusministerkonferenz, 2022). Seit der Ratifizierung der UN-Behindertenrechtskonvention im Jahr 2009 und der damit entstandenen Veränderung des Beschulungsortes von Schüler*innen mit sonderpädagogischem Förderbedarf stehen die Lehrkräfte vor der Herausforderung, den Unterricht für Schüler*innen mit höchst unterschiedlichen Lernvoraussetzungen zu gestalten, ohne dass der Zeitaufwand für die Vor- und

Nachbereitung stark steigen kann (Arndt & Werning, 2013). Buchhaupt et al., 2019). Dabei ist es schwierig, allen Lernenden zu ermöglichen, dass sie gemeinsam arbeiten und aktiv sowie effektiv am Unterricht teilnehmen können. In den Naturwissenschaften kann der Aufwand für Lehrkräfte noch einmal deutlich steigen, wenn Experimente eingesetzt werden.

Um die verschiedenen Fächer zu verbinden, arbeiten im Projekt E²piMINT Vertreter*innen aus der Didaktik der drei Naturwissenschaften und der Sonderpädagogik zusammen. Ein Austausch zwischen den naturwissenschaftlichen Fachdidaktiken und der Inklusionspädagogik, der sonst oft selten stattfindet, wird dadurch erleichtert (Menthe & Hoffmann, 2015; Stinken-Rösner et al., 2020).

1.2. Das verwendete Unterrichtskonzept

Grundlage für das Unterrichtskonzept im Projekt E²piMINT ist das „Lernen am gemeinsamen Gegenstand“ (Feuser, 1982). In diesem Rahmen kann eine Balance zwischen individualisierten und gemeinschaftlichen Handlungsmustern gefunden werden. Das Experimentieren bietet dabei eine kraftvolle Gelegenheit, Wege zu finden, allen die Teilnahme zu

ermöglichen (Brigham et al., 2011). Deswegen wurde die Stationenarbeit als Methode ausgewählt.

Die Stationen sind in Form von Experimentierkisten gestaltet, die im Projekt „Forscherboxen“ genannt werden. Heterogene 3er- oder 4er-Gruppen arbeiten mit den Forscherboxen und wechseln zwischen Einzelarbeitsphasen, in denen jede*r Schüler*in die Verantwortung für das eigene Experiment trägt, und Gruppenarbeitsphasen, in denen die sozialen Kompetenzen und der Austausch innerhalb der Gruppe gefördert werden. Das Ziel besteht nicht darin, alle Stationen zu bearbeiten, sondern sich intensiv mit einer Box zu beschäftigen, sodass einerseits jede Person zu „Expert*in“ für den eigenen Versuch wird und andererseits alle Teilnehmer*innen einer Gruppe gemeinsam zu „Expert*innen“ des Themas der Box werden können. Aufbauend darauf werden die Forscherboxen so gestaltet, dass sie vier Einzelversuche und eine Gruppenaufgabe bzw. ein Gruppenexperiment enthalten. Um mögliche Zugangsschwierigkeiten zu überwinden und das Interesse am Thema zu steigern, enthält jede Box neben schriftlichen auch Video-Anleitungen, Hilfekarten und Zusatzaufgaben (Pantiri et al., 2023).

1.3. Fächerübergreifende Themen

Im Projekt E²piMINT wurden zwei Themen ausgewählt, die sich gut für eine Verknüpfung der drei naturwissenschaftlichen Fächer eignen: das Thema „Farben“ und das Thema „Kleben und Haften“. Pro Thema sind sieben verschiedene Forscherboxen mit Unterthemen vorgesehen, die das Hauptthema aus unterschiedlichen Perspektiven behandeln.

Das Thema „Farben“ wurde im Schuljahr 2022/23 entwickelt und erprobt (Pantiri et al., 2024a). Die dazu ausgearbeiteten Forscherboxen sind in Pantiri et al. (2024b) vorgestellt. Zunächst wurden die Boxen in den Schülerlaboren der Goethe-Universität mit verschiedenen Schulklassen getestet. Anschließend wurden sie an Schulen ausgeliehen, um ihre Einsetzbarkeit in der Schulpraxis zu untersuchen.

Das Thema „Kleben und Haften“ wurde im Rahmen eines Seminars für Lehramtsstudierende im Sommersemester 2024 entwickelt. Die entstandenen Forscherboxen wurden im Schuljahr 2024/25 in den Schülerlaboren der Goethe-Universität getestet und anschließend an Schulen ausgeliehen. Dieses Seminar und diese Boxen werden im Folgenden vorgestellt.

2. Das interdisziplinäre Seminar

In den Instituten für Didaktik der Chemie und der Physik sowie in der Abteilung für Didaktik der Biowissenschaften der Goethe-Universität gibt es Seminare, in denen Experimentiersituationen für das Lehr-Lernlabor (Haupt et al., 2013) entwickelt und mit Schulklassen getestet werden. Teilweise haben die Studierenden auch die Möglichkeit, eigene kleine Forschungsprojekte zu planen und durchzuführen.

Neu war im Sommersemester 2024 zum einen, das Seminar für Studierende aller Studiengänge der Sekundarstufe I und aller Naturwissenschaften zu öffnen, und zum anderen das Ziel, Erkenntnisse zum Thema Inklusion in der Schule zu vermitteln. Dies geschah durch die Vorstellung eines erprobten Unterrichtskonzepts und die Sammlung von Praxiserfahrungen. Im Rahmen des Seminars konnten die Studierenden am Forschungsprojekt E²piMINT teilnehmen und wertvolle Inhalte und Materialien in einer ersten Version vorschlagen. Diese wurden nach einer Überarbeitung und Pilotierung in dem Forschungsprojekt eingesetzt.

2.1. Ziel des Seminars

Das Hauptziel der Studierenden im Seminar war die Entwicklung und Erprobung eines inklusiven Schülerlabors zum Thema „Kleben und Haften“ für die Sekundarstufe I nach dem Unterrichtskonzept des Projekts E²piMINT. Die notwendigen Schritte, um dieses Ziel zu erreichen, sind im Folgenden aufgelistet:

- Konzeption und Entwicklung von NaWi-Forscherboxen (jede Box wurde von einer Gruppe Studierender entwickelt),
- Vorbereitung einer Fortbildung für Lehrkräfte der Sekundarstufe I aller Schulformen und Teilnahme an dieser,
- Erprobung der entwickelten Forscherboxen mit Schulklassen,
- Überarbeitung der Materialien nach Reflexion und der Erprobung.

2.2. Teilnehmende am Seminar

Am Seminar im Sommersemester 2024 nahmen insgesamt 23 Lehramtsstudierende der Fächer Physik, Biowissenschaften und Chemie teil. Vertreten waren das Lehramt Gymnasium, Haupt- und Realschule und Förderschule. Die Arbeitsgruppen, die zustande kamen, waren – soweit möglich – fächergemischt, um den Austausch zwischen den verschiedenen Perspektiven zu erleichtern. Die finale Abgabe der Arbeits- und Entwicklungsergebnisse im Seminar erfolgte in Form eines Portfolios, in dem alle Experimentier- und Unterrichtsmaterialien sowie Hinweise für Lehrkräfte enthalten waren.

2.3. Ablaufplan und Organisation des Seminars

Abbildung 1 zeigt den Ablaufplan des Seminars dargestellt, der im Folgenden ausführlich beschrieben wird. Getestet wurden die entwickelten Materialien mit fünf Schulklassen: einer Klasse der 7. Jgst. eines Gymnasiums, einer (Hauptschul-)Klasse der 7. Jgst. einer kooperativen Gesamtschule, einer Mittelstufenklasse einer Förderschule, einer Klasse der 8. Jgst. einer Förderschule und einer (Gymnasial-)Klasse der 9. Jgst. einer kooperativen Gesamtschule.

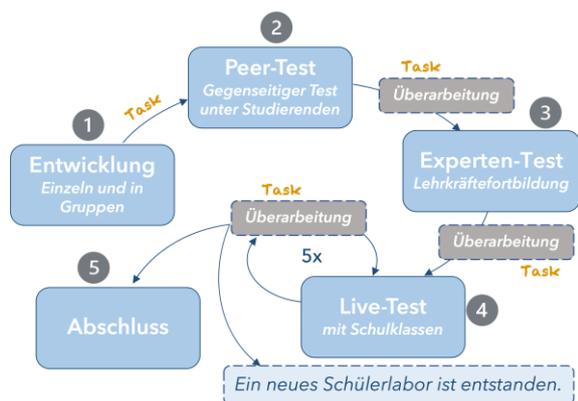


Abb. 1: Ablaufplan des Seminars in Sommersemester 2024 (eigene Darstellung).

2.3.1. Die Entwicklungsphase im Seminar

Im ersten Schritt des Seminarablaufs wurden die Forscherboxen entwickelt. Zu Beginn des Seminars fand eine einführende Sitzung statt, in der das Thema und der Plan des Seminars sowie die Aufgaben für die Studierenden vorgestellt wurden. Danach gab es die erste Aufgabe: die Studierenden sollten Experimente aus einer oder mehreren Naturwissenschaften herausuchen, die sich mit dem Thema „Kleben und Haften“ befassen und für die Sekundarstufe I geeignet erscheinen.

Ab der zweiten Sitzung folgte die Entwicklungsphase, die drei Einzelsitzungen à 90 Min. umfasste. In dieser Phase wurden die gefundenen Experimente in der Runde und mit den betreuenden Personen besprochen, die endgültige Auswahl getroffen, die Experimente an die Personen verteilt und die Arbeitsgruppen gebildet. Die Gruppeneinteilung fand nach Themen statt: Die Experimente mussten zu thematische Forscherboxen gruppiert werden, weshalb auch die Personen in entsprechenden Gruppen eingeteilt wurden. Die Gruppen waren meistens gemischt und die Experimente entsprachen nicht unbedingt den Fächern der einzelnen Personen. Dies unterstützte den Austausch in der Gruppe und im gesamten Seminar. Während der Entwicklungsphase hatte jede*r Studierende zum einen eine individuelle Aufgabe, d. h. er/sie musste einen Einzelversuch entwickeln und die entsprechenden Hintergrundinformationen, die Materialliste, die Anleitung und ggf. Hinweise erstellen. Zum anderen hatte jede Gruppe die Gruppenarbeiten und Hilfestellungen für die Forscherboxen zu entwickeln. Die Einzelpersonen und die Gruppen waren dafür verantwortlich, dass die Experimente nach Anleitung funktionierten, bereits ausprobiert wurden und die Materialien verfügbar waren (wobei die Besorgung und Bestellung der Materialien von den betreuenden Personen übernommen wurde).

2.3.2. Der Peer-Test

Nachdem die erste Version jeder Forscherbox fertiggestellt war, fand im zweiten Schritt des Seminars ein Peer-Test statt (eine Doppelsitzung à 180 Minuten). Die Studierenden testeten die Versuche der anderen

Gruppen und gaben Feedback zur Überarbeitung der Unterrichtsmaterialien.

2.3.3. Der Experten-Test

Im dritten Schritt des Seminars fand eine Lehrkräftefortbildung statt, die in der Abbildung 1 als „Experten-Test“ gekennzeichnet ist, und eine Doppelsitzung in Anspruch nahm. Dabei testeten die Lehrkräfte die Versuche und gaben aus ihrer Perspektive Feedback zur Überarbeitung der Materialien. Die Studierenden konnten von dem Praxiswissen der Lehrkräfte profitieren und danach ihre Materialien überarbeiten.

2.3.4. Der Live-Test

Im vierten Schritt wurden die Forscherboxen mit Schulklassen erprobt, was in der Abbildung als „Live-Test“ bezeichnet wird (fünf Doppelsitzungen). Schulklassen verschiedener Schulformen nahmen am Schülerlabor teil (pro Sitzung eine Klasse). Die Studierenden betreuten die Experimente und beobachteten Stärken und Schwächen der Arbeits- und Experimentiermaterialien. Nach jedem Besuch einer Schulklasse konnten die Studierenden oder die Gruppen selbst entscheiden, ob eine Überarbeitung der Unterrichtsmaterialien nötig war. Je nach Studiengang und Fach hatten die Studierenden verschiedene Anwesenheitspflichten. So ergab sich, dass nicht alle an allen Terminen teilnehmen mussten, sondern nur an einigen ausgewählt.

2.3.5. Seminarabschluss

Im fünften und letzten Schritt wurde das Seminar am Ende des Semesters gemeinsam mit den Studierenden reflektiert. Einige Ergebnisse und Erkenntnisse aus dieser Reflexion werden im Folgenden vorgestellt.

3. Evaluation des Seminars

Am Ende des Seminars nahmen die Studierenden an einer schriftlichen Befragung mit offenen Fragen zur Evaluation des Seminars teil. Dabei sollten sie über das Seminar reflektieren und ihre Meinung mitteilen. Im Anschluss fand eine freiwillige mündliche Diskussion über einige der in den Fragebögen behandelten Themen statt. In diesem Abschnitt wird auf die aus der qualitativen Analyse gewonnenen positiven Erkenntnisse und Verbesserungsvorschläge der Studierenden eingegangen.

An der Befragung nahmen 14 der 23 Teilnehmenden des Seminars teil. Hauptgrund für diese Quote ist die nicht vorsehbare Überschneidung des letzten Sitzungstermins mit verschiedenen Prüfungsterminen der Studierenden.

3.1. Positive Rückmeldungen

Die am häufigsten genannten Stärken des Seminars werden – nach Kategorien gruppiert – hier vorgestellt. Dabei wird jeweils angegeben, wie viele Studierende denselben Vorteil genannt haben. Argumente, die von weniger als drei Studierenden genannt wurden, werden im Allgemeinen nicht berücksichtigt – es sei denn, dass relevante Gründe vorliegen.

- Interdisziplinarität (12 Nennungen bei 14 Studierenden): Damit ist die Möglichkeit gemeint, die Perspektive anderer Naturwissenschaften kennenzulernen und einen sinnvollen Austausch mit anderen Studierenden zu haben („man lernt voneinander“). Zum Zeitpunkt des Seminars gab es kein anderes Seminar, das die drei NaWi-Fächer kombinierte.
- Praxis-Bezug und Kontakt mit Schülerinnen und Schülern (8 von 14): Vorteile sind beispielsweise, dass man einen „tieferen Einblick in die Denkweise der Lernenden“ bekommt und die erstellten Materialien in der Praxis mit genug Zeit ausprobieren kann.
- Förderung der Kreativität (8 von 14): Die Studierenden konnten eigene Experimente entwickeln und ihre Kreativität einbringen. Dies war durch die Flexibilität und Freiheit möglich, die ihnen gelassen wurde.
- „Es hat Spaß gemacht.“ (3 von 14): Obwohl nur drei Studierenden diesen Vorteil genannt haben, ist es wichtig zu betonen, dass man, wenn man selbst Spaß bei der Vorbereitung einer Unterrichtseinheit hat, bessere Ergebnisse erreichen kann.

3.2. Kritische Rückmeldungen

Die Rückmeldungen sind nach Haupt- und Unterkategorien gruppiert und es wird angegeben, wie viele Studierende denselben Vorschlag gegeben haben. Vorschläge von weniger als drei Studierenden werden im Allgemeinen nicht berücksichtigt – es sei denn, dass relevante Gründe vorliegen.

Was die Organisation des Seminars betrifft, gab es folgende Rückmeldungen:

- a) Aufgabengestaltung und Transparenz (11 von 14): Der Vorschlag, die Aufgaben klarer zu kommunizieren, kam nach der Feststellung, dass zu Beginn des Seminars nicht klar war, dass so viele Überarbeitungen nötig sein würden. Viele Studierende fühlten sich von der Menge der Aufgaben überfordert.
- b) Die Lernplattform, die als Ablageplattform für Materialien verwendet wurde, übersichtlicher gestalten (6 von 14): Es gab zu viele Ordner und es war nicht klar, wo sich die endgültige und letzte überarbeitete Version eines Unterrichtsmaterials befand.
- c) Mehr Zeit (4 von 14): Die Studierenden brauchten sowohl für die Überarbeitung der Materialien nach der Fortbildung als auch während der Seminarsitzungen teilweise mehr Zeit als geplant, um die Materialien vor Ort zu verbessern und einige Ideen sofort zu testen.
- d) Themenvergabe besser gestalten (4 von 14): Einige Studierende hatten aufgrund von Dopplungen Versuche zugeteilt bekommen, die nicht ihre erste Wahl waren.

- e) Die Lehrkräftefortbildung soll für alle verpflichtend sein (2 von 14): Viele Studierende waren der Meinung, dass die Lehrkräftefortbildung für alle verpflichtend sein sollte. Obwohl dies nur von zwei Studierenden explizit als Verbesserungsvorschlag genannt wurde, ist es ein wichtiger Vorschlag. In mündlichen Gesprächen – auch während der Sitzungen – wurde er häufig von unterschiedlichen Studierenden geäußert, sowohl von denjenigen, die an der Fortbildung teilgenommen haben, als auch von denjenigen, die nicht anwesend waren.

An inhaltliche Rückmeldungen ist zu nennen:

- f) Drei der 14 Studierenden gaben an, dass das Thema uninteressant war.
- g) Drei der 14 Studierenden gaben an, dass ihnen eine tiefere Vorstellung des Themas sowie eine genauere Besprechung der Experimente gefehlt habe.

3.3. Anpassungsideen

Die Verbesserungsvorschläge stellen nicht die Idee des Seminars an sich infrage, was sich auch an den positiven Anmerkungen der Studierenden zeigt. Sie kritisieren vielmehr die Organisation und die Einsetzbarkeit in der Praxis. Hier werden vorläufigen Ideen an möglichen Anpassungen gelistet:

- a) Den Seminarplan besser erstellen und zu Beginn transparenter kommunizieren, dass je nach den Verbesserungsvorschlägen, die nach dem Besuch einer Schulklasse geäußert werden, oder je nach festgestellter Schwierigkeit, mehrere Überarbeitungen als geplant notwendig sein können.
- b) Die digitale Lernplattform umstrukturieren, z. B. mit weniger Ordnern.
- c) Eine zusätzliche Sitzung ohne Anwesenheitspflicht einplanen, in der die Studierenden vor Ort sein können, um die Materialien zu überarbeiten und Live-Feedback von den Dozierenden zu erhalten.
- d) Eine gemeinsame Plattform benutzen, auf der man sofort sehen kann, ob ein Versuch bereits ausgewählt wurde oder nicht. Wenn es trotzdem zu Dopplungen kommt, sollten die Versuche nicht durch die Dozierenden, sondern durch die Studierenden zugeteilt werden.

Um der in Punkt g) geäußerten Kritik nachzukommen, kann die erste Sitzung so gestaltet werden, dass die Teilnehmenden eine tiefere inhaltliche Einführung in das Thema erhalten. Zusätzlich können die bereits zur Verfügung gestellte vertiefende Materialien erweitert werden. Einzelne Experimente können dann vor Ort intensiver besprochen werden.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass alle oben genannten Punkte leicht umsetzbar sind. Elf der vierzehn Studierenden, die an der Befragung teilnahmen, haben sich zur Frage, ob sie ein solches Seminar wieder besuchen möchten, positiv geäußert und dessen Wichtigkeit anerkannt.

3.4. Weitere Aspekte

Fünf der 14 Studierenden gaben im Feedbackbogen an, dass es bei der Gruppenarbeit zu Schwierigkeiten gekommen sei. Beispiele dafür sind, dass sie sich eine bessere Absprache innerhalb der Gruppe gewünscht hätten und die Aufgaben nicht immer fair verteilt wurden.

Zu beachten ist außerdem, dass die Planung und Durchführung eines solchen Seminars organisations- und zeitaufwändig sind, weshalb die Betreuung durch mindestens zwei Personen empfohlen wird. Je nach Thema müssen viele Experimentiermaterialien besorgt und ein guter Überblick über alle Experimente gewährleistet werden.

4. Die sieben Forscherboxen zum Thema „Kleben und Haften“

In diesem Abschnitt werden die sechs im Laufe des Seminars entwickelten Forscherboxen vorgestellt. Zusätzlich wird die siebte Forscherbox präsentiert, die in einer Staatsexamensarbeit entwickelt wurde und in die Erprobung im Rahmen des Seminars integriert wurde (siehe Webseite des Projekts unter: https://www.bio.uni-frankfurt.de/162697607/Inklusiven_NaWi_Unterricht_mit_Forscherboxen_gestalten_Sek_I).

4.1. Kleben und Haften in der Tier- und Pflanzenwelt

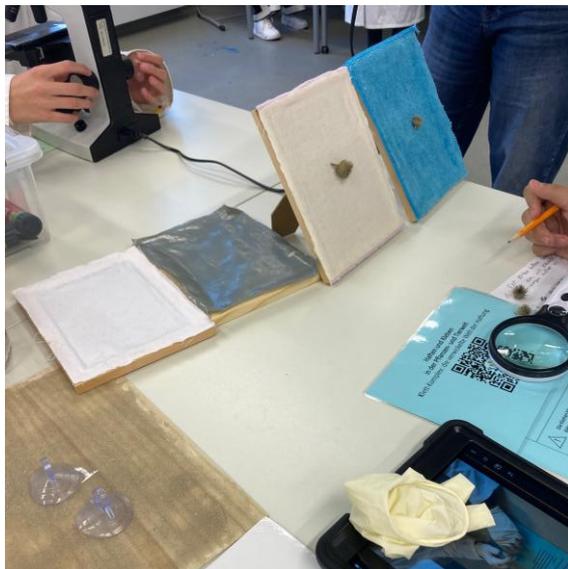


Abb. 2: Experimente mit Kletten und Saugnäpfen aus der Forscherbox „Kleben und Haften in der Tier- und Pflanzenwelt“ (eigene Erstellung).

Der Fokus dieser Box liegt auf einigen physikalischen und chemischen Prinzipien des Klebens und Haftens, wie sie in der Natur zu finden sind. Viele Lebewesen nutzen diese, um an Oberflächen zu haften oder sich daran zu befestigen. Diese Fähigkeiten haben sich im Laufe der Evolution für verschiedene Zwecke wie Fortbewegung, Nahrungsbeschaffung, Schutz oder die Verbreitung von Samen entwickelt. Sie können auch als Inspirationsquelle für technische

Innovationen dienen. Beispiele dafür sind Klettverschlüsse oder Saugnäpfe. Leitfragen, die sich mit der Bearbeitung der Box vertiefen lassen, sind u. a.: Wie kann der Gecko an der Wand laufen? Warum haften Blütenpollen an den Beinen der Bienen?

4.2. Welcher Kleber eignet sich für welche Oberfläche?

Mit der zweiten Box sollen Schüler*innen erkennen, dass es viele verschiedene Klebstoffe gibt und dass die Auswahl des richtigen Klebers für eine Oberfläche entscheidend ist, um eine zweckmäßige Verbindung herstellen zu können. Die Experimente der Box sind in Form eines Rätsels gestaltet, bei dem die verschiedenen Kleber unkenntlich gemacht sind. Darüber hinaus wird untersucht, wie sich die Klebfähigkeit durch Veränderungen, z. B. durch Oberflächenbehandlung (Reinigen oder Aufrauen), beeinflussen lässt.



Abb. 3: Verschiedene geklebten Materialien aus der Forscherbox „Welcher Kleber eignet sich für welche Oberfläche?“ (eigene Erstellung).

4.3. Wasser als Klebstoff

Wie und warum kann Wasser als Klebstoff wirken? In dieser Box werden alltägliche Beispiele benutzt, wie das Ankleben von nasser Kleidung an der Haut, um herauszufinden, welche Eigenschaften des Wassers dafür verantwortlich sind, dass es „kleben“ kann. Unter anderem werden Adhäsion und Kohäsion thematisiert, die für alle Kleber wichtig sind. Abschließend wird in der Gruppe diskutiert, warum Wasser allein jedoch kein dauerhafter Klebstoff ist: Bei Verdunstung oder Trockenheit verschwindet die Haftung, da das Wasser selbst nicht mehr anwesend ist.

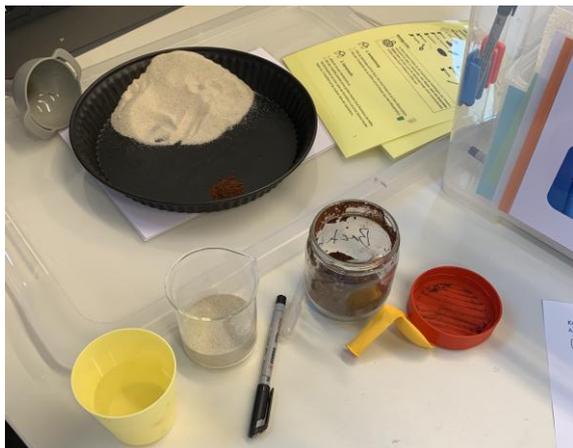


Abb. 4: Experiment zu Sand und Kakao aus der Forscherbox „Wasser als Klebstoff“ (eigene Erstellung).

4.4. Wie stark ist ein Kleber? Klebkraft testen

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die maximale Belastbarkeit eines Klebers zu testen. Diese werden hier ausprobiert, indem die Belastbarkeit eines Klebers gemessen wird und die Faktoren untersucht werden, die dabei eine Rolle spielen und die Klebkraft beeinflussen können. Dazu zählen beispielsweise die Art der Materialien, die Oberflächenstruktur, die Klebstoffmenge, die Trocknungszeit und die Umgebungsbedingungen.



Abb. 5: Experimente mit Klebern und Federwaagen aus der Forscherbox „Wie stark ist ein Kleber? Klebkraft testen“ (eigene Erstellung).

4.5. Kleber lösen

Mit dieser Forscherbox sollen verschiedene Methoden zur Entfernung von Klebstoffen erprobt und ihre Anwendbarkeit im Alltag reflektiert werden. Die Fragestellung ermöglicht es den Lernenden, eigene Erfahrungen, beispielsweise mit Etiketten oder Bastelkleber, mit naturwissenschaftlichen Konzepten zu verknüpfen. Es werden vor allem chemische Methoden mit Lösemitteln ausprobiert, aber auch andere Verfahren, wie das mechanische Abkratzen oder die thermische Behandlung, können erprobt und thematisiert werden. Wie bereits in der zweiten Box zeigt sich auch hier, dass nicht alle Mittel für die Oberfläche und den verwendeten Kleber gleichermaßen geeignet sind.



Abb. 6: Verschiedene Materialien mit aufgeklebten Klebern zum Entfernen aus der Forscherbox „Kleber lösen“ (eigene Erstellung).

4.6. Kleber selbst herstellen

Mit den Experimenten dieser Box können Schüler*innen Klebstoffe aus einfachen, haushaltsüblichen Substanzen selbst herstellen. Beispiele dafür sind Casein-Kleber (aus Milch) oder Gelatine (aus Gummibärchen). Die Experimente bieten einen einfachen Zugang zu naturwissenschaftlichem Arbeiten und helfen, das Verständnis für Alltagschemie zu entwickeln. Neben dem experimentellen Charakter steht der nachhaltige und ressourcenschonende Umgang mit Materialien im Vordergrund. Die entstandenen Naturstoffkleber eignen sich für leichte Anwendungen wie Papier- oder Bastelarbeiten. Sie bieten die Gelegenheit, die Wirkung, die Grenzen und die Zusammensetzung von Klebstoffen kritisch zu reflektieren. Eine Verknüpfung mit der vierten Box ist möglich, indem die Schüler*innen ihre selbst hergestellten Kleber auch testen.



Abb. 7: Vorbereitung verschiedener Naturstoffkleber aus der Forscherbox „Kleber selbst herstellen“ (eigene Erstellung).

4.7. Die Natur als Vorbild – Haihaut- und Lotuseffekt

In dieser Forscherbox werden noch zwei Phänomene aus der Natur aufgegriffen. Zum einen gehen die Lernenden der Frage nach: Warum bleiben die Blätter der Lotuspflanze immer sauber? Der sogenannte Lotuseffekt beschreibt ein Phänomen, bei dem Wasser und Schmutzpartikel von einer Oberfläche abperlen, ähnlich wie bei den Blättern der Lotuspflanze. Dabei nimmt das ablaufende Wasser den Schmutz mit, sodass die Oberfläche sauber bleibt. Zum anderen steht die Frage im Mittelpunkt: Warum haften Seepocken an Walen, aber nicht an Haien? Die Haut von Haien ist mit kleinen Plakoidschuppen bedeckt, die eine raue, hydrodynamische Struktur bilden. Diese verhindert das Anhaften von Seepocken und anderen Organismen. Wale hingegen besitzen eine glatte, weiche Haut ohne solche Schutzmechanismen. Die Schüler*innen lernen durch einfache Experimente mit verschiedenen Pflanzenblättern sowie mit echter Hai- und Fischhaut diese beiden Effekte kennen. Sie bauen Modelle dafür und betrachten die Eigenschaften unter einem Binokular.



Abb. 8: Haihaut unter einem Binokular aus der Forscherbox „Die Natur als Vorbild – Haihaut- und Lotuseffekt“ (eigene Erstellung).

5. Literatur

Arndt, A.K., Werning, R. (2013). Unterrichtsbezogene Kooperation von Regelschulen und Lehrkräften für Sonderpädagogik. Ergebnisse eines qualitativen Forschungsprojektes. In: Ann-Kathrin Arndt und Rolf Werning (Hrsg.): Inklusion:

- Kooperation und Unterricht entwickeln. Bad Heilbrunn: Klinkhardt, 12–40.
- Brigham, F.J., Scruggs, T.E. and Mastropieri, M.A. (2011). Science Education and Students with Learning Disabilities. *Learning Disabilities Research & Practice*, 26: 223-232. <https://doi.org/10.1111/j.1540-5826.2011.00343.x>
- Buchhaupt, F., Hahn, L.; Katzenbach, D., Klein, A. et al. (2019). Evaluation der Modellregion Inklusive Bildung Frankfurt am Main. *Frankfurter Beiträge zur Erziehungswissenschaft*, 21. Norderstedt. DBR Collective (2003). Design-Based-Research: An Emerging Paradigm for Educational Inquiry. *Educational Researcher*, 32, 5-8.
- Feuser, G. (1982). Integration = die gemeinsame Tätigkeit (Spielen/Lernen/Arbeit) am gemeinsamen Gegenstand/Produkt in Kooperation von behinderten und nichtbehinderten Menschen. *Behindertenpädagogik* 21 (2), 86–105.
- Haupt, O. J., Domjahn, J., Martin, U., Skiebecorrette, P., Vorst, S., Zehren, W., und Hempelmann, R. (2013). Schülerlabor - Begriffsschärfung und Kategorisierung. *Der Mathematisch-Naturwissenschaftliche Unterricht*, 66, S. 324-330.
- Inklusiven NaWi-Unterricht mit Forscherboxen gestalten: [https://www.bio.uni-frankfurt.de/162697607/Inklusiven NaWi Unterricht mit Forscherboxen gestalten_Sek I](https://www.bio.uni-frankfurt.de/162697607/Inklusiven_NaWi_Unterricht_mit_Forscherboxen_gestalten_Sek_I) (Stand: 30.05.2025)
- Kultusministerkonferenz (2022). Sonderpädagogische Förderung in Förder- und Regelschulen. Statistische Veröffentlichungen der Kultusministerkonferenz, Dokumentation Nr. 223 - Februar 2020, 128-131. DOI: 10.3278/6001820hw
- Menthe, J., & Hoffmann, T. (2015). Inklusiver Chemieunterricht: Chance und Herausforderung. In J. Riegert, & O. Musenberg (Hrsg.): *Inklusiver Fachunterricht in der Sekundarstufe*. Stuttgart: Kohlhammer, 131-140.
- Pantiri, G.; Burkhardt, L. M.; Wilhelm, T.; Wenzel, V.; Lühken, A.; Katzenbach, D. (2023). Entwicklung praxistauglicher, inklusiver MINT-Vermittlungskonzepte für die Schule - In: Grötzebauch, H. & Heinicke S. (Hrsg.): *PhyDid B, Didaktik der Physik, Beiträge zur virtuellen DPG-Frühjahrstagung 2023*, 247 - 251, <https://ojs.dpg-physik.de/index.php/phydid-b/article/view/1373/1566>
- Pantiri, G.; Wilhelm, T.; Burkhardt, L. M.; Wenzel, V.; Lühken, A.; Katzenbach, D. (2024a). Inklusiver NaWi-Unterricht: Erprobung von Lernstationen zu Farben – In: v. VORST, H. (Hrsg.): *Frühe naturwissenschaftliche Bildung,*

Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Jahrestagung in Hamburg 2023, Band 44, 2024, S. 470 – 473, https://gdcp-ev.de/wp-content/uploads/securepdfs/2024/06/H11_Pantiri.pdf

Pantiri, G.; Wilhelm, T.; Burkhardt, L. M.; Wenzel, V.; Lühken, A.; Katzenbach, D. (2024b). Forscherboxen und Unterrichtsmaterial zum Thema „Farben“ im inklusiven NaWi-Unterricht. In: GRÖTZEBAUCH, H. & HEINICKE S. (Hrsg.): PhyDid B, Didaktik der Physik, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung 2024, S. 159-166, <https://ojs.dpg-physik.de/index.php/phydid-b/article/view/1455/1627>

Stinken-Rösner, L. et al. (2020). Thinking Inclusive Science Education from two Perspectives: inclusive Pedagogy and Science Education. RISTAL, 3, 30–45

Wilhelm, T.; Hopf, M. (2014). Design-Forschung. In: Dirk Krüger, Ilka Parchmann und Horst Schecker (Hrsg.): Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung. Berlin u.a: Springer Spektrum, 31–42.

Danksagung

Herzlichen Dank an Frau Dr. Edith Nitsche, die das Seminar mit durchgeführt hat. Wir bedanken uns bei ihr für ihre Mitarbeit und Unterstützung.

Multi-repräsentationale Lernaufgaben zur Vektoranalysis in der Studieneingangsphase

Larissa Hahn*, Alexander Voigt[†], Philipp Mertsch[†], Pascal Klein*

*Universität Göttingen, Physik und ihre Didaktik, Friedrich-Hund-Platz 1, 37077 Göttingen

[†]RWTH Aachen, Institut für Theoretische Teilchenphysik und Kosmologie, Sommerfeldstr. 16, 52074 Aachen
larissa.hahn@uni-goettingen.de

Kurzfassung

Um Vektorfeldkonzepte wie Divergenz oder Rotation in physikalischen Kontexten anzuwenden, ist ein solides Verständnis ihrer Grundlagen erforderlich. Bisherige empirische Forschungsergebnisse bei Studierenden zeigten hierbei Schwierigkeiten auf, die sich z. B. auf die visuelle Interpretation von Vektorfelddiagrammen zurückführen lassen und in physikalische Anwendungsgebiete, z. B. die Elektrodynamik, transferieren. Im Einklang mit lerntheoretischen Erkenntnissen wird daher der Einsatz multipler Repräsentationen bei der Vermittlung dieser Konzepte empfohlen. Auf Basis empirischer Vorarbeiten wurden Lernaufgaben entwickelt, die einen visuellen Zugang zur Vektoranalysis anhand von multiplen Repräsentationen (MR) ermöglichen und Zeichenaktivitäten sowie ein interaktives Vektorfeld-Visualisierungswerkzeug integrieren. Die MR-Lernaufgaben wurden in die begleitenden Übungen einer Elektromagnetismus-Vorlesung an der Universität Göttingen implementiert ($N = 81$). Die Wirksamkeitsanalyse ergab höhere Lerneffekte der MR-Lernaufgaben im Vergleich zu traditionellen, rechenbasierten Aufgaben. Eine Implementation der Lernaufgaben in die begleitenden Übungen einer Vorlesung zu mathematischen Methoden der Physik an der RWTH Aachen zielt neben einer Replikation der Ergebnisse auf die Lernwirksamkeit der MR-Lernaufgaben bezüglich der Anwendung vektoranalytischer Konzepte in physikalischen Kontexten ab. Dieser Beitrag präsentiert die Konzeption entsprechender Aufgaben eines Performanztests zur Anwendung der Vektoranalysis in der Fluidmechanik, Elektro- sowie Magnetostatik.

1. Einleitung

Vektoren und Vektorfelder nehmen eine zentrale Stellung in der Hochschulphysik ein. Besonders bedeutsam sind vor allem die Differentialoperatoren, mit deren Hilfe charakteristische Eigenschaften eines Feldes beschrieben werden können – etwa dessen Quellen oder Wirbel. Ebenso spielen die Integralsätze von Gauß und Stokes eine fundamentale Rolle (eine Übersicht der zentralen Definitionen der Vektoranalysis findet sich im Anhang). Vektoranalytische Konzepte sind dabei insbesondere für die Fluidmechanik und die Elektrodynamik von zentraler Relevanz, zwei bedeutenden Teilgebieten der Physik. Dort bilden sie die Grundlage für das Verständnis und die mathematische Beschreibung physikalischer Phänomene.

Ein solides Verständnis der Vektoranalysis ist aufgrund ihrer grundlegenden fachlichen Bedeutung ein zentraler Bestandteil des Physikstudiums. So konnten Burkholder et al. (2021) nachweisen, dass eine umfangreiche Vorbereitung der Vektorrechnung signifikant mit dem Studienerfolg in einem Einführungskurs zum Elektromagnetismus korreliert. Gleichzeitig legen weitere Studien nahe, dass insbesondere das vektoranalytische Konzeptwissen, das für das physikalische Verständnis entscheidend ist, vielen Studierenden Schwierigkeiten bereitet (Singh & Maries, 2013). Da im Lehralltag vor allem abstrakte, formal-mathematische Zugänge dominieren, wird deutlich, dass es innovativer Lehr-Lern-Materialien zur

Vektoranalysis bedarf, um einen anschaulichen Zugang zu ermöglichen. Lernwirksamkeitsanalysen sollten dabei über mathematisch-abstrahierte Testaufgaben hinaus vor allem die Anwendung vektoranalytischer Konzepte in typischen Teilgebieten der Physik, z. B. der Elektrodynamik, adressieren (Bollen et al., 2015).

Angesichts dieser Befunde und Überlegungen präsentiert dieser Beitrag eine Forschungslinie zu Lernwirksamkeitsanalysen multi-repräsentationaler Aufgaben zur Vektoranalysis, die in Lehrveranstaltungen der Studieneingangsphase implementiert werden. Im Zentrum steht die Entwicklung physikbezogener Aufgaben für einen Vektoranalysis-Test, der im Rahmen einer Replikationsstudie zur Lernwirksamkeitsanalyse eingesetzt wird.

2. Fachdidaktischer Hintergrund

In diesem Abschnitt werden die empirischen und theoretischen Grundlagen für die Entwicklung der multi-repräsentationalen Lernaufgaben und kontextbezogener Testitems zur Vektoranalysis vorgestellt. Dazu werden zunächst empirische Ergebnisse zu Lernschwierigkeiten bei Studierenden im Umgang mit Vektorfeldkonzepten und deren Anwendung in physikalischen Kontexten zusammengefasst (für eine ausführliche Zusammenfassung siehe Hahn, 2024). Anschließend wird der Ansatz des Lernens mit multiplen Repräsentationen, sowie weitere didaktische

Methoden, als Grundlage für die Entwicklung der Lernaufgaben und des Vektoranalysis-Tests vorgestellt.

2.1. Lernschwierigkeiten im Umgang mit Vektorfeldern und vektoranalytischen Konzepten

Vorangegangene Studien belegen, dass die Erstellung von Vektorfelddiagrammen für viele Studierende eine erhebliche Herausforderung darstellt ($N = 196$; Bollen et al., 2017). Schwierigkeiten traten insbesondere bei der vollständigen und korrekten Darstellung der Feldeigenschaften auf, z. B. hinsichtlich der radialen Veränderung von Richtung und Betrag der Vektoren. Darüber hinaus zeigten Studierende grundlegende Verständnisschwierigkeiten in Bezug auf die graphische Darstellung als Vektorfelddiagramm. So wurden Vektoren als gekrümmte Pfeile gezeichnet und alle Vektoren im Ursprung beginnend oder an ihrem Ort zentriert dargestellt (Bollen et al., 2017). Bei der Bestimmung eines entsprechenden mathematischen Ausdrucks zu einem Vektorfelddiagramm wurden darüber hinaus Probleme deutlich, die sich auf die Wahl eines geeigneten Koordinatensystems sowie die Nutzung von Einheitsvektoren und Komponenten bezogen (Bollen et al., 2017; Gire & Price, 2012).

Darüber hinaus legten empirische Studien zahlreiche Defizite von Studierenden beim Verständnis der Differentialoperatoren offen. Beispielsweise zeigten Studierende Schwierigkeiten, zu beurteilen, ob ein ebenes Vektorfelddiagramm divergenz- bzw. rotationsfrei ist oder nicht (Ambrose, 2004; Baily und Astolfi, 2014; Bollen et al., 2015; Jung und Lee, 2012; Klein et al., 2018, 2019; Singh und Maries, 2013). Eine Analyse der verwendeten Strategien ergab, dass nur 3% der Studierenden konzeptuelle Erklärungen formulierten, mit diesen allerdings 100% Erfolgsquote erreichten (Bollen et al., 2015). Etwa ein Viertel der Studierenden überführte das Vektorfelddiagramm in einen entsprechenden mathematischen Ausdruck und berechnete die Differentialoperatoren anschließend. Für Vektorfelddiagramme in kartesischen Koordinaten erzielten sie damit eine Erfolgsquote von über 50%, für radialsymmetrische Felder unter 50% (Bollen et al., 2015). Ein verbreitetes Phänomen ist zudem, Divergenz und Rotation wörtlich zu verstehen und sich bei der Interpretation von Vektorfelddiagrammen von Oberflächenmerkmalen des Diagramms leiten zu lassen (Baily & Astolfi, 2014). So wird Divergenz mit einem Auseinanderlaufen des Feldes und Rotation mit einer Richtungsänderung im Feldverlauf assoziiert (Baily und Astolfi, 2014; Bollen et al., 2016; Jung und Lee, 2012; Singh und Maries, 2013).

Im Hinblick auf die Integralsätze von Gauß und Stokes zeigten verschiedene Studien zudem zahlreiche Verständnishürden von Studierenden bezüglich der Interpretation der entsprechenden Weg-, Oberflächen- und Volumenintegrale sowie vektoriellen Linien-, Flächen- und Volumendifferentiale (Jones, 2020; Schermerhorn & Thompson, 2019). Huffman

et al. (2020) zeigten zudem, dass Studierende zwar die mathematische Form des Gaußschen Satzes reproduzieren können, jedoch erhebliche Schwierigkeiten bei der qualitativen Interpretation des Satzes haben ($N = 60$). Fast die Hälfte der Befragten gab an, keine sinnvolle Interpretation formulieren zu können.

2.2. Lernschwierigkeiten bei der Anwendung der Vektoranalysis in physikalischen Kontexten

Jenseits der mathematischen Dimension zeigten Studien, dass ein unzureichendes Verständnis vektoranalytischer Konzepte unmittelbar zu Fehlinterpretationen in physikalisch-technischen Kontexten führen kann. So beobachteten Pepper et al. (2012), dass Studierende bei der Analyse elektrischer Felder häufig entweder nur die Richtung oder nur den Betrag der Vektoren berücksichtigten – eine Vorgehensweise, die auf grundlegende Schwierigkeiten mit der vektoriellen Struktur dieser Felder hinweist. In einer Studie von Bollen et al. (2015) bestimmen nur 5% der Teilnehmenden am Ende eines Elektromagnetismus-Einführungskurses ($N = 19$) Divergenz und Rotation des Magnetfeldes eines geraden, stromdurchflossenen Leiters anhand eines Vektorfelddiagramms korrekt. Typische Hürden stellten vor allem die Verwendung krummliniger Koordinaten und die mathematische Beschreibung des Feldes in kartesischen Koordinaten dar. Zudem stellten Pepper et al. (2012) fest, dass nur 26% der Studierenden ($N = 51$) eines Elektromagnetismus-Kurses divergenzfreie Bereiche des elektrischen Feldes einer kugelförmigen Ladungsschale korrekt angeben konnten. Auch bei der Interpretation von Linien-, Oberflächen- und Volumenintegralen zeigten Lernende erhebliche Schwierigkeiten, vor allem im Hinblick auf deren Bedeutung als Summenbegriffe, z. B. beim Ampère'schen Gesetz (Wallace & Chasteen, 2010). Weitere Studien dokumentierten darüber hinaus vielfältige Probleme im Umgang mit den Maxwell'schen Gleichungen – sowohl in ihrer differentiellen (Bollen et al., 2015, 2016) als auch in ihrer integralen Form (Li & Singh, 2017) – sowie bezüglich des elektrischen Potentials (Pepper et al., 2012). Bollen et al. (2016) beobachteten, dass Studierende zur Beurteilung der Divergenz und Rotation elektromagnetischer Felder Skizzen anfertigten, diese jedoch häufig fehlerhaft oder für sie selbst nicht interpretierbar waren. Als mögliche Ursache nennen die Autor:innen u. a., dass sich Lernende auf Berechnungen konzentrieren, statt auf zugrundeliegende Konzepte, was eine Integration mathematischer Kenntnisse in den elektromagnetischen Kontext erschwert. Zusammenfassend betonen Pepper et al. (2012), dass viele der beobachteten Schwierigkeiten bei der Anwendung vektoranalytischer Konzepte im Elektromagnetismus darauf zurückzuführen sind, dass es Studierenden schwerfällt, mathematische Werkzeuge gezielt einzusetzen, physikalische Konzepte mit Rechenoperationen zu verknüpfen und die jeweilige physikalische Situation angemessen in ihre Überlegungen einzubeziehen.

2.3. Multiple Repräsentationen, Zeichenaktivitäten und digitalgestützte Visualisierungen zur Unterstützung des Lernens vektoranalytischer Konzepte

Angesichts der beschriebenen Forschungsbefunde zu studentischen Lernschwierigkeiten im Umgang mit Vektorfeldern, vor allem im Hinblick auf die Anwendung in physikalischen Kontexten, fordern Bollen et al. (2015, 2016) Instruktionen zur Vektoranalysis, die eine Verknüpfung von Mathematik und Physik fokussieren. Sie plädieren dabei für einen konzeptuell-visuellen Ansatz, der eine Interpretation der entsprechenden Konzepte adressiert. Diese Empfehlungen entsprechen den Vorschlägen von Dray und Manogue (1999) zur Überwindung der „vector calculus gap“. Gleichzeitig folgen sie dem didaktischen Konsens zum Einsatz multipler visueller Repräsentationen, deren Lernwirksamkeit häufig nachgewiesen werden konnte (Nieminen et al., 2012; Rau, 2017).

Vor diesem Hintergrund entwickelten Klein et al. (2018) multi-repräsentationale Instruktionmaterialien zur visuellen Interpretation der Divergenz von Vektorfelddiagrammen. Diese instruieren sowohl die differentielle (Gl. 2 Anhang) als auch auf die integrale Definition der Divergenz (Gl. 4 Anhang). In einer Folgestudie wurden zusätzliche Hilfen zur Komponentenerlegung in der Instruktion der differentiellen Strategie ergänzt und anschließend erfolgte der Transfer zur Rotation eines Vektorfeldes (Klein et al., 2019; Gl. 3 Anhang). Die empirischen Ergebnisse zeigten eine Steigerung des konzeptionellen Verständnisses der Lernenden infolge der durchgeführten Interventionen. In begleitenden Interviews wurde insbesondere die Zerlegung des Feldes in seine Feldkomponenten als zentrale Schwierigkeit benannt (Gl. 1 Anhang; Klein et al., 2018). Als Reaktion darauf integrierten zwei weitere experimentelle Studien Zeichenaktivitäten, um die visuelle Interpretation der Divergenz gezielt zu unterstützen (Hahn & Klein, 2021, 2022a, 2023a). Neben positiven Lerneffekten zeigte sich hierbei, dass das Skizzieren einzelner Feldkomponenten die subjektiv empfundene kognitive Belastung bei der Divergenzbeurteilung signifikant verringern konnte (Hahn & Klein, 2022a, 2023a).

Im Kontext des multi-repräsentationalen Lernens wird der Einsatz digitalgestützter Visualisierungen vielfach als lernförderlich betont (De Jong, 2011). Studien zeigen, dass solche Werkzeuge durch die Veranschaulichung abstrakter Inhalte das konzeptuelle Verständnis fördern und durch ihre Interaktivität lernendenzentrierte Lernumgebungen kreieren können (Wieman et al., 2010; Wu et al., 2001). Mehrere Untersuchungen belegten zudem, dass der gezielte Einsatz von Zeichenaktivitäten das Lernen mit digitalen Visualisierungen effektiv unterstützen kann (Kohnle et al., 2020; Wu & Rau, 2018). So ermöglicht das begleitende Zeichnen u. a. ein vertieftes Verständnis der entsprechenden Repräsentationen (Ainsworth et al., 2011; Kohnle et al., 2020).

3. Implementation multi-repräsentationaler Lernaufgaben zur Vektoranalysis in die Studieneingangsphase

Auf Basis der beschriebenen Vorarbeiten zum Lernen vektoranalytischer Inhalte sowie der theoretischen Überlegungen zur Unterstützung des Lernens mit multiplen Repräsentationen wurden multi-repräsentationale (MR) Lernaufgaben zur Vektoranalysis, d. h. zu Divergenz und Rotation, sowie den Integralsätzen von Gauß und Stokes, entwickelt (Hahn & Klein, 2022b). Diese enthalten verschiedene Repräsentationsformen, d. h. Vektorfelddiagramme, mathematische Ausdrücke sowie verbale Beschreibungen, und involvieren diagrammspezifische Zeichenaktivitäten und ein digitalgestütztes Vektorfeld-Visualisierungswerkzeug (Hahn et al., 2024). Lernwirksamkeitsanalysen der MR-Lernaufgaben erfolgen im Rahmen von Implementationen der Lernaufgaben in die begleitenden Übungen von Lehrveranstaltungen in der Studieneingangsphase des Physikstudiums.

3.1. Primärstudie: Hahn & Klein (2023b, 2025)

In den Sommersemestern 2022 bis 2024 wurden die MR-Lernaufgaben in die begleitenden Übungen einer universitären Elektromagnetismus-Vorlesung im zweiten Studiensemester an der Universität Göttingen implementiert (Hahn & Klein, 2023b, 2025). Im Vergleich einer Interventionsgruppe (IG) mit MR-Lernaufgaben und einer Kontrollgruppe (KG) mit traditionellen, rechenbasierten Lernaufgaben wurde die Lernwirksamkeit der MR-Lernaufgaben anhand verschiedener Performanzindikatoren (Antwortkorrektheit, Antwortsicherheit) sowie der kognitiven Belastung bei der Aufgabenbearbeitung untersucht ($N = 81$; Hahn & Klein, 2025). Die Erfassung der Performanz erfolgte dabei im Rahmen eines Vektoranalysis-Tests, der Konzeptwissen und Repräsentationskompetenzen im Umgang mit Vektorfeldern erfasste, ohne einen physikalischen Kontext zu referenzieren (Hahn & Klein, 2023b).

Die Lernwirksamkeitsanalyse ergab, dass Studierende, die mit MR-Lernaufgaben arbeiteten, einen höheren Lernzuwachs erzielten (Hake-Gain $g_{H,IG} = 0.35$, $g_{H,KG} = 0.13$), eine höhere lernrelevante kognitive Belastung wahrnahmen (germane cognitive load; Signifikanz $p = 0.02$, Effektstärke Cohens $d = 0.48$) und im Posttest nach der Interventionsphase einen höheren Score erreichten ($p = 0.04$, $d = 0.40$; Hahn & Klein, 2025). Das Vektorfeld-Visualisierungswerkzeug empfahlen die Studierenden der Interventionsgruppe für weitere Studieneingangsvorlesungen, vor allem Lehrveranstaltungen zu den mathematischen Methoden der Physik (Hahn et al., 2024).

3.2. Replikationsstudie

Im Sommersemester 2025 erfolgt eine Implementation der MR-Lernaufgaben in die Studieneingangsphase Physik an der RWTH Aachen. Der Einschätzung der Studierenden folgend, dass das Vektorfeld-Visualisierungswerkzeug vor allem in

mathematischen Grundlagenveranstaltungen hilfreich wäre, werden die MR-Lernaufgaben dabei in die begleitenden Übungen der Veranstaltung „Mathematische Methoden der Physik II“ implementiert. Physikstudierende besuchen diese Vorlesung typischerweise im zweiten Studiensemester parallel zur Elektromagnetismus-Lehrveranstaltung. Mit Blick auf die empirischen Befunde zu Schwierigkeiten bei der Anwendung vektoranalytischer Konzepte in der Physik (Kap. 2.2) adressiert diese Replikationsstudie neben Konzeptwissen und Repräsentationskompetenzen in mathematisch-abstrahierten Kontexten die Anwendung der Vektoranalysis in der Elektro- und Magnetostatik sowie der Fluidmechanik.

4. Vektoranalysis-Test: Kontextbezogene Items

Während die mathematisch-abstrahierten Items des Vektoranalysis-Tests in der Replikationsstudie denen der Primärstudie entsprechen (siehe Hahn & Klein, 2023b, für Beschreibung und Item-/Skalenanalysen), wurden die Aufgaben zur Fluidmechanik und zum Elektromagnetismus für die Replikationsstudie neu entwickelt. Fachdidaktische und methodische Überlegungen der Konzeption dieser Items werden im Folgenden beschrieben.

4.1. Fluidmechanik-Aufgabe: Wasserstrahl

Bisherige Items zur Anwendung der Vektoranalysis nutzten vor allem Kontexte elektrischer und magnetischer Felder (z. B. Bollen et al., 2015; Pepper et al., 2012); die Fluidmechanik wurde hingegen kaum als Anwendungskontext verwendet. Aufbauend auf den Überlegungen von Rabe et al. (2022) wird in den Vektoranalysis-Test der Replikationsstudie eine solche Aufgabe integriert. Konkret adressiert sie einen zweidimensionalen Wasserstrahl aus einem Wasserhahn im homogenen Gravitationsfeld auf der Erdoberfläche. Für das den Wasserstrahl beschreibende Geschwindigkeitsvektorfeld $\vec{v}(x, y)$ gilt die Kontinuitätsgleichung. Da Wasser (näherungsweise) inkompressibel ist, folgt daraus $\text{div } \vec{v}(x, y) = 0$. Die Einführung in den Kontext und die Aufgabenstellung von Teilaufgabe a) lauten:

In der Küche fließe Wasser aus einem Wasserhahn. Die Geschwindigkeit des Wasserstrahls in Abbildung 1 ist durch das dargestellte Geschwindigkeitsvektorfeld $\vec{v}(x, y)$ gegeben.

Für einen Wasserstrahl gilt im Allgemeinen die Kontinuitätsgleichung. Aus dieser kann geschlossen werden, dass für das Geschwindigkeitsfeld gilt $\text{div } \vec{v}(x, y) = 0$.

a) Erklären Sie, warum der Wasserstrahl in Abbildung 1 nicht divergenzfrei sein kann.

Dieser Aufgabenteil zielt auf die Bestimmung der Divergenz des gegebenen Vektorfeldes ab und adressiert so eine zentrale Schwierigkeit von Studierenden, die Divergenz eines ebenen Vektorfelddiagramms zu bestimmen (z. B. Singh & Maries, 2013). Der Lösungsweg ist dabei frei von den Lernenden

bestimmbar, z. B. können sie die differentielle oder integrale Definition der Divergenz für ihre Erklärung verwenden oder die Divergenz berechnen, nachdem sie das Vektorfeld durch einen geeigneten mathematischen Ausdruck beschrieben haben (ähnlich wie bei Bollen et al., 2015). In den meisten Fällen bedarf es hierbei eines Repräsentationswechsels vom Vektorfelddiagramm in eine verbale Erklärung, z. B. der Veränderung der Feldkomponenten, oder in einen mathematischen Ausdruck zur Berechnung der Divergenz.

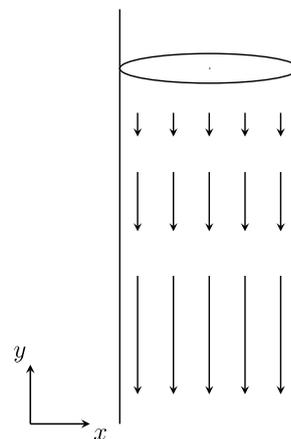


Abb. 1: Aufgabe zur Fluidmechanik: Wasserstrahl aus einem Wasserhahn im homogenen Gravitationsfeld auf der Erdoberfläche (eigene Darstellung).

In Aufgabenteil a) gibt der Kontext der Fluidmechanik die Rahmenbedingungen vor. Für die Bearbeitung der Aufgabe sind jedoch keine kontextspezifischen Argumente oder Konzepte notwendig. Die Fluidmechanik selbst rückt in Aufgabenteil b) stärker in den Fokus:

b) Skizzieren Sie den Wasserstrahl so, dass in Übereinstimmung mit der Kontinuitätsgleichung $\text{div } \vec{v}(x, y) = 0$ gilt.

Die besondere Schwierigkeit bei diesem Aufgabenteil besteht darin, dass der zu skizzierende Wasserstrahl nicht nur divergenzfrei ist, sondern gleichzeitig dem Anwendungskontext, d. h. dem Wasserstrahl im homogenen Gravitationsfeld auf der Erdoberfläche, genügt. Das bedeutet, dass die Zunahme des Betrages der vertikalen Komponente des Geschwindigkeitsvektorfeldes in negative y -Achsenrichtung, wie in Abbildung 1 dargestellt, auch in der Skizze gegeben sein muss. Darüber hinaus muss das Geschwindigkeitsvektorfeld eine von Null verschiedene horizontale Komponente besitzen, die die Geschwindigkeitszunahme in vertikaler Richtung ausgleicht. Anschaulich bedeutet dies, dass sich der Wasserstrahl verjüngt. Mit Blick auf bestehende Vorarbeiten zur Skizzierung von Vektorfelddiagrammen adressiert dieser Aufgabenteil zudem ein grundlegendes Verständnis bezüglich der Darstellungsform eines Vektorfeldes als Vektorfelddiagramm (Bollen et al., 2017).

4.2. Elektrostatik-Aufgabe: Gauß'sches Gesetz

Die Aufgabe zur Elektrostatik adressiert ein zentrales Gesetz der Elektrodynamik, das Gauß'sche Gesetz im Vakuum. Es besagt, dass der Fluss eines elektrischen Feldes \vec{E} durch die geschlossene, nach außen orientierte Oberfläche ∂V eines Volumengebiets $V \subset \mathbb{R}^3$ proportional zur elektrischen Ladung Q ist, die sich in V befindet, $\oint_{\partial V} d\vec{A} \cdot \vec{E} = Q/\epsilon_0$. Das Integral auf der linken Seite des Gauß'schen Gesetzes ist ein Oberflächenintegral 2-ter Art, bei dem das ortsabhängige Skalarprodukt aus dem Flächennormalenvektor $d\vec{A}$ und dem elektrischen Feld \vec{E} über die Randfläche ∂V integriert wird. Die konkrete Aufgabenstellung lautet:

Zur analytischen Bestimmung des elektrischen Feldes $\vec{E}(\vec{r})$ in einem Volumen V kann das Gauß'sche Gesetz, $\oint_{\partial V} d\vec{A} \cdot \vec{E} = Q/\epsilon_0$ verwendet werden. Q beschreibt die Ladung im Volumen V , die von der geschlossenen Randfläche ∂V eingeschlossen wird. Zur Notation: Es gilt $d\vec{A} = \vec{n}dA$.

Betrachten Sie folgende Aussage. Geben Sie an, ob die Aussage korrekt oder inkorrekt ist und begründen Sie Ihre Antwort.

Wenn es in V keine Ladungen gibt ($Q = 0$), dann ist $\vec{E} = \vec{0}$ in V .

Diese Aufgabe zielt vor allem auf ein Verständnis und eine Interpretation des gegebenen Oberflächenintegrals ab. Das Integral kann einerseits direkt als Gesamtfluss des elektrischen Feldes durch die Oberfläche ∂V , d. h. als Bilanzierung des Skalarprodukts aus elektrischem Feld und Flächennormalenvektor über die Oberfläche interpretiert werden. Andererseits kann das Integral mithilfe des Gauß'schen Satzes $\oint_{\partial V} d\vec{A} \cdot \vec{E} = \iiint_V dV \operatorname{div} \vec{E}$ als Bilanzierung von Teilladungen in V interpretiert werden. Eine konzeptuelle Interpretation solcher mathematischer Konstrukte stellte sich in vorangegangenen Studien als schwierig für Studierende heraus (Huffman et al., 2020; Jones, 2020; Schermerhorn & Thompson, 2019; Wallace & Chasteen, 2010). Die Besonderheit der hier vorgestellten Elektrostatik-Aufgabe gegenüber diesen Arbeiten liegt vor allem im konkreten Kontextbezug. So kann eine mögliche Lösung auch darin liegen, sich ein Gegenbeispiel zu der in der Aufgabenstellung angegebenen Aussage zu überlegen. Beispielsweise kann eine elektrische Punktladung außerhalb von V betrachtet werden, die ein elektrisches Feld erzeugt, das in V nicht verschwindet. In diesem Fall kann die Interpretation des Oberflächenintegrals vermieden und stattdessen der Zusammenhang zwischen der elektrischen Ladungsverteilung und dem elektrischen Feld für die Problemlösung herangezogen werden. Insgesamt erfordert die Begründung in den meisten Fällen einen Repräsentationswechsel von der dargestellten Gleichung hin zu einer verbalen Erläuterung.

4.3. Magnetostatik-Aufgabe: Gerader, stromdurchflossener Leiter

Die Aufgabe zur Magnetostatik greift ein typisches Beispiel aus der Elektromagnetismus-Vorlesung auf, das magnetische Feld \vec{B} im Vakuum außerhalb eines unendlich langen, geraden, von einem homogenen Ladungsstrom durchflossenen Leiters. Charakteristisch für das Magnetfeld ist, dass es gleichzeitig divergenz- und wegen $\vec{j} = \vec{0}$ rotationsfrei ist.

Bollen et al. (2015) nutzten dieses Beispiel ebenfalls als Kontext-Aufgabe in einem Vektoranalysis-Test. Die Studierenden sollten hierbei erklären, an welchen Stellen im Feld Divergenz und Rotation (Nicht-)Null sind. Im Vektoranalysis-Test der hier vorgestellten Replikationsstudie liegt der Fokus neben der Bestimmung der Differentialoperatoren aus einem Vektorfelddiagramm vor allem auf der Konfrontation typischer Schwierigkeiten von Studierenden. Die Aufgabenstellung lautet:

Das Vektorfeld in Abbildung 2 zeigt das Magnetfeld \vec{B} eines geraden, stromdurchflossenen Leiters in der Ebene. Der Leiter verläuft senkrecht zur dargestellten Ebene und schneidet diese im grauen Punkt. Die technische Stromrichtung im Leiter mit der elektrischen Stromdichte \vec{j} zeigt aus der Ebene heraus.

a) Im Allgemeinen gilt, dass es keine magnetischen Monopole gibt, d. h., dass für das Magnetfeld gilt $\operatorname{div} \vec{B} = 0$. Erklären Sie, dass das Feld in Abbildung 2 divergenzfrei ist, obwohl die Stärke des Magnetfeldes proportional zur Entfernung vom Leiter abnimmt.

b) Für die Rotation eines statischen Magnetfeldes gilt $\operatorname{rot} \vec{B} = \mu_0 \vec{j}$. Außerhalb des stromdurchflossenen Leiters ist die Stromdichte $\vec{j} = \vec{0}$ und das Feld ist rotationsfrei. Erklären Sie, wie \vec{B} rotationsfrei sein kann, wenn das Feld doch kreisförmig um den Leiter verläuft.

Beide Aufgabenteile evozieren einen kognitiven Konflikt, indem typische Lernschwierigkeiten von Studierenden adressiert werden. So lassen sich Studierende bei der Beurteilung von Vektorfeldern häufig von Äußerlichkeiten des Feldes leiten (Baily & Astolfi, 2014). Bei der Divergenz ist es, z. B. das Auseinanderlaufen des Feldes, bei der Rotation ist es die Richtungsänderung von Vektoren, die als Indikator für eine von Null verschiedene Divergenz bzw. Rotation genutzt wird (Bollen et al., 2016). Die Herausforderung liegt dabei darin, in einem, für die meisten Lernenden, bekannten Kontext die Interpretation des Feldes auf die mathematische Definition der Divergenz zu fokussieren und sich nicht von der äußeren Form des Feldes leiten zu lassen. Der Lösungsweg zur Beantwortung der Aufgabe ist dabei frei bestimmbar, z. B. können die Lernenden die differentielle oder die integrale Definition der Differentialoperatoren verwenden, diese berechnen nachdem sie das Feld mit einem geeigneten mathematischen Ausdruck

beschrieben haben oder eine Skizze, z. B. der Feldkomponenten, zur Erklärung heranziehen (ähnlich wie bei Bollen et al., 2015).

Im Gegensatz zur Fluidmechanik-Aufgabe ist bei der Aufgabe zum geraden, stromdurchflossenen Leiter kein Koordinatensystem vorgegeben. Die Studierenden können daher frei wählen, ob sie kartesische oder krummlinige Koordinaten nutzen (ähnlich wie bei Bollen et al., 2015). Damit adressiert diese Aufgabe eine typische Anforderung, die Studierenden beim kontextfreien Repräsentationswechsel vom Diagramm zum mathematischen Ausdruck in Vorarbeiten erhebliche Schwierigkeiten bereitet (Kap. 2.1; Bollen et al., 2017; Gire & Price, 2012).

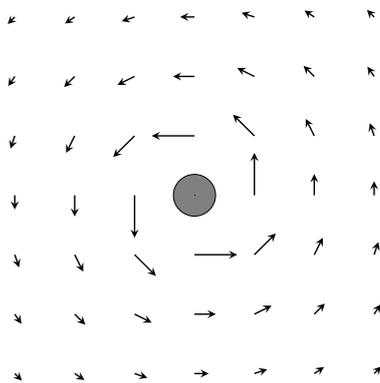


Abb. 2: Aufgabe zur Magnetostatik: Vektorfelddiagramm des Magnetfeldes eines geraden, stromdurchflossenen Leiters (eigene Darstellung).

Durch die fehlende Vorgabe des Koordinatensystems rückt zudem der Anwendungskontext stärker in den Fokus. So ist die Verwendung von Polarkoordinaten zur Bearbeitung der Aufgabe vermeintlich einfacher, da der Betrag des Magnetfeldes eines geraden, stromdurchflossenen Leiters radialsymmetrisch ist (Dray & Manogue, 1999). Zum Prä-Messzeitpunkt vor der Intervention bietet die Bearbeitung der Magnetostatik-Aufgabe somit zusätzliche Einblicke darin, welches Koordinatensystem bevorzugt zur Argumentation herangezogen wird. Im Vergleich mit der Bearbeitung zum Post-Messzeitpunkt nach der Intervention lässt sich dann untersuchen, welchen Einfluss die Intervention auf diese Wahl hat. Dabei ist zu beachten, dass die MR-Lernaufgaben vorrangig die Differentialoperatoren in kartesischen Koordinaten instruieren; Divergenz und Rotation in krummlinigen Koordinaten werden nur als Transferaufgabe in die Lerneinheit integriert. Die Wahl des Koordinatensystems zum Post-Messzeitpunkt kann daher zudem Anhaltspunkte für die Notwendigkeit gezielter Instruktionen von vektoranalytischen Konzepten in krummlinigen Koordinaten bieten.

5. Fazit und Ausblick

Zur Analyse der Lernwirksamkeit multi-repräsentationaler Lernaufgaben zur Vektoranalysis im Zuge einer Replikationsstudie wurden kontextbezogene

Aufgaben zur Anwendung vektoranalytischer Konzepte in der Fluidmechanik und im Elektromagnetismus entwickelt. Diese adressieren zahlreiche Schwierigkeiten von Studierenden, die in Vorarbeiten vor allem in mathematisch-abstrahierten Kontexten auftreten, z. B. die Beurteilung der Divergenz und Rotation eines ebenen Vektorfelddiagramms und die Interpretation eines Oberflächenintegrals. Neben der reinen Kompetenzmessung bietet die Offenheit der Aufgabenstellungen und Antwortformate darüber hinaus vielfältiges Potential für weitere Forschungsrichtungen. Beispielsweise kann untersucht werden, welche Definition der Divergenz (differenziell oder integral) Studierende bevorzugt zur Argumentation heranziehen und welchen Einfluss die Intervention auf diese Wahl hat. Außerdem bietet die Aufgabenbearbeitung Einblicke in die Schwierigkeiten von Studierenden in der physikalischen Anwendung vektoranalytischer Konzepte, im Umgang mit kartesischen und krummlinigen Koordinaten, bei der Argumentation im Umgang mit vektoranalytischen Konzepten, beim Repräsentationswechsel verschiedener Vektorfeld-Darstellungen und bei der Skizzierung von Vektorfelddiagrammen.

6. Literatur

- Ainsworth, Shaaron; Prain, Vaughan; Tytler, Russell (2011): Drawing to learn in science. In: *Science*, 333(6046), 1096–1097, <https://doi.org/10.1126/science.1204153>
- Ambrose, Bradley S. (2004): Investigating student understanding in intermediate mechanics: Identifying the need for a tutorial approach to instruction. In: *American Journal of Physics*, 72, 453–459, <https://doi.org/10.1119/1.1648684>
- Baily, Charles; Astolfi, Cecilia (2014): Student reasoning about the divergence of a vector field. In: *Proceedings of the Physics Education Research Conference 2014*, Minneapolis, MN (AIP, New York, 2014), S. 31–44, <https://doi.org/10.1119/perc.2014.pr.004>
- Bollen, Laurens; Van Kampen, Paul; Baily, Charles; De Cock, Mieke (2016): Qualitative investigation into students' use of divergence and curl in electromagnetism. In: *Physical Review Physics Education Research*, 12(2), 020134, <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.12.020134>
- Bollen, Laurens; Van Kampen, Paul; Baily, Charles; De Cock, Mieke (2017): Student difficulties regarding symbolic and graphical representations of vector fields. In: *Physical Review Physics Education Research*, 13(2), 020109, <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.13.020109>
- Bollen, Laurens; Van Kampen, Paul; De Cock, Mieke (2015): Students' difficulties with vector calculus in electrodynamics. In: *Physical Review Special Topics – Physics Education Research* 11(2), 020129,

- <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.11.020129>
- Burkholder, Eric; Murillo-Gonzalez, Gabriel; Wierman, Carl (2021): Importance of math prerequisites for performance in introductory physics. In: *Physical Review Physics Education Research*, 17(1), 010108, <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.17.010108>
- De Jong, Ton (2011): Instruction based on computer simulations. In: R. E. Mayer & P. A. Alexander (Hrsg.), *Handbook of Research on Learning and Instruction* (London: Routledge). S. 446–466.
- Dray, Tevian; Manogue, Corinne A. (1999): The vector calculus gap: Mathematics \neq physics. In: *Problems, Resources, and Issues in Mathematics Undergraduate Studies*, 9(1), 21–28, <https://doi.org/10.1080/10511979908965913>
- Gire, Elizabeth; Price, Edward (2012): Graphical representations of vector functions in upper-division E&M. In: *AIP Conference Proceedings*, 1413(1), S. 27–30, <https://doi.org/10.1063/1.3679985>
- Hahn, Larissa (2024): *Vektorfeldkonzepte in der Studieneingangsphase Physik. Über die Wirkung multi-repräsentationaler Lehr-Lern-Materialien und die Rolle der visuellen Aufmerksamkeit*. Dissertation (Göttingen: Universität Göttingen), Url: <https://ediss.uni-goettingen.de/handle/11858/15212>
- Hahn, Larissa; Blaue, Simon, A.; Klein, Pascal (2024): A research-informed graphical tool to visually approach Gauss' and Stokes' theorems in vector calculus. In: *European Journal of Physics*, 45, 025706, <https://doi.org/10.1088/1361-6404/ad2390>
- Hahn, Larissa; Klein, Pascal (2021): Multiple Repräsentationen als fachdidaktischer Zugang zum Satz von Gauß-Qualitative Zugänge zur Interpretation der Divergenz von Vektorfeldern. In: *PhyDid B, Didaktik der Physik, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung, 1*, S. 95–100, Url: <https://ojs.dpg-physik.de/index.php/phydid-b/article/view/1151>
- Hahn, Larissa; Klein, Pascal (2022a): Kognitive Entlastung durch Zeichenaktivitäten? Eine empirische Untersuchung im Kontext der Vektoranalysis. In: *Unsicherheit als Element von naturwissenschaftsbezogenen Bildungsprozessen, Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, virtuelle Jahrestagung 2021*, S. 384–387, Url: https://www.gdcp-ev.de/wp-content/tb2022/TB2022_384_Hahn.pdf
- Hahn, Larissa; Klein, Pascal (2022b): Vektorielle Feldkonzepte verstehen durch Zeichnen? Erste Wirksamkeitsuntersuchungen. In: *PhyDid B, Didaktik der Physik, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung, 1*, S. 119–126, Url: <https://ojs.dpg-physik.de/index.php/phydid-b/article/view/1259/1485>
- Hahn, Larissa; Klein, Pascal (2023a): Analysis of eye movements to study drawing in the context of vector fields. In: *Frontiers in Education*, 8, 1162281, <https://doi.org/10.3389/feduc.2023.1162281>
- Hahn, Larissa; Klein, Pascal (2023b): The impact of multiple representations on students' understanding of vector field concepts: Implementation of simulations and sketching activities into lecture-based recitations in undergraduate physics. In: *Frontiers in Psychology*, 13, 1012787, <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.1012787>
- Hahn, Larissa; Klein, Pascal (2025): The impact of multiple representations on students' understanding of vector field concepts: Implementation of simulations and sketching activities into lecture-based recitations in undergraduate physics. In: *Frontiers in Psychology*, 16, 1544764, <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2025.1544764>
- Huffman, James A.; Vignal, Michael; Wilcox, Bethany R. (2020): Investigating upper-division students' interpretations of the Divergence Theorem. In: *Proceedings of the Physics Education Research Conference 2020*, Virtual (AIP, New York, 2020), S. 222–227, <https://doi.org/10.1119/perc.2020.pr.Huffman>
- Jones, Steven R. (2020): Scalar and vector line integrals: A conceptual analysis and an initial investigation of student understanding. In: *The Journal of Mathematical Behavior*, 59, 100801, <https://doi.org/10.1016/j.jmathb.2020.100801>
- Jung, Kyesam; Lee, Gyounggho (2012): Developing a tutorial to address student difficulties in learning curl: A link between qualitative and mathematical reasoning. In: *Canadian Journal of Physics*, 90(6), 565–572, <https://doi.org/10.1139/p2012-054>
- Klein, Pascal; Viiri, Jouni; Kuhn, Jochen (2019): Visual cues improve students' understanding of divergence and curl: Evidence from eye movements during reading and problem solving. In: *Physical Review Physics Education Research*, 15(1), 010126, <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.15.010126>
- Klein, Pascal; Viiri, Jouni; Mozaffari, Saleh; Dengel, Andreas; Kuhn, Jochen (2018): Instruction-based clinical eye-tracking study on the visual interpretation of divergence: How do students look at vector field plots? In: *Physical Review Physics Education Research*, 14(1), 010116, <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.14.010116>
- Kohnle, Antje; Ainsworth, Shaaron; Passante, Gina (2020): Sketching to support visual learning with interactive tutorials. In: *Physical Review Physics Education Research*, 16(2), 020139, <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.16.020139>

- Li, Jing; Singh, Chandralekha (2017): Investigating and improving introductory physics students' understanding of symmetry and Gauss's law. In: *European Journal of Physics*, 39(1), 015702, <https://doi.org/10.1088/1361-6404/aa8d55>
- Nieminen, Pasi; Savinainen, Antti; Viiri, Jouni (2012): Relations between representational consistency, conceptual understanding of the force concept, and scientific reasoning. In: *Physical Review Special Topics – Physics Education Research*, 8(1), 010123, <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.8.010123>
- Pepper, Rachel; Chasteen, Stephanie; Pollock, Steven; Perkins, Katherine (2012): Observations on student difficulties with mathematics in upper-division electricity and magnetism. In: *Physical Review Special Topics - Physics Education Research*, 8(1), 010111, <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.8.010111>
- Rabe, Christian; Drews, Vincent; Hahn, Larissa; Klein, Pascal (2022): Einsatz von multiplen Repräsentationsformen zur qualitativen Beschreibung realer Phänomene der Fluidodynamik. In: *PhyDid B, Didaktik der Physik, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung, 1*, S. 71–77, <https://ojs.dpg-physik.de/index.php/phydid-b/article/view/1269/1491>
- Rau, Martina (2017): Conditions for the effectiveness of multiple visual representations in enhancing STEM learning. In: *Educational Psychology Review*, 29(4), 717–761, <https://doi.org/10.1007/s10648-016-9365-3>
- Schermerhorn, Benjamin P.; Thompson, John R. (2019): Physics students' construction of differential length vectors in an unconventional spherical coordinate system. In: *Physical Review Physics Education Research*, 15(1), 010111, <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.15.010111>
- Singh, Chandralekha; Maries, Alexandru (2013): Core graduate courses: A missed learning opportunity? In: *AIP Conference Proceedings*, 1513, S. 382–385, <https://doi.org/10.1063/1.4789732>
- Wallace, Colin S.; Chasteen, Stephanie V. (2010): Upper-division students' difficulties with Ampère's law. In: *Physical Review Special Topics - Physics Education Research*, 6(2), 020115, <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.6.020115>
- Wieman, Carl E.; Adams, Wendy K.; Loeblein, Trish; Perkins, Katherine (2010): Teaching physics using PhET simulations In: *The Physics Teacher*, 48(4), 225–227, <https://doi.org/10.1119/1.3361987>
- Wu, Hsin-Kai; Krajcik, Joseph S.; Soloway, Elliot (2001): Promoting understanding of chemical representations: Students' use of a visualization tool in the classroom. In: *Journal of Research in Science Teaching*, 38(7), 821–842, <https://doi.org/10.1002/tea.1033>
- Wu, Sally P.; Rau, Martina A. (2018): Effectiveness and efficiency of adding drawing prompts to an interactive educational technology when learning with visual representations. In: *Learning and Instruction*, 55, 93–104, <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2017.09.010>

Anhang

Ebene Vektorfelder im \mathbb{R}^2 werden typischerweise durch die Komponentenzersetzung

$$\vec{v}(x, y, z = 0) = v_x(x, y)\vec{e}_x + v_y(x, y)\vec{e}_y \quad \{1\}$$

(x -Komponente v_x , y -Komponente v_y , kartesische Einheitsvektoren \vec{e}_x und \vec{e}_y) oder graphisch mithilfe von Pfeilen, dargestellt, welche Richtung und Betrag des Feldes in jedem Punkt repräsentieren. Für die physikalisch-technische Anwendung sind besonders die Eigenschaften des Feldes relevant. So gibt die Divergenz eines ebenen Vektorfeldes $\vec{v}(x, y, z = 0)$

$$\operatorname{div} \vec{v} = \vec{\nabla} \cdot \vec{v} = \frac{\partial}{\partial x} v_x + \frac{\partial}{\partial y} v_y \quad \{2\}$$

in ihrer differentiellen Definition über die partiellen Ableitungen $\partial/\partial x$ und $\partial/\partial y$ Aufschluss über die Quellen und Senken von \vec{v} und seine Rotation

$$\operatorname{rot} \vec{v} = \vec{\nabla} \times \vec{v} = \left(\frac{\partial}{\partial x} v_y - \frac{\partial}{\partial y} v_x \right) \hat{e}_z \quad \{3\}$$

indiziert die Wirbelstärke von \vec{v} . In ihrer Anwendung in drei Dimensionen werden häufig die integralen Definitionen der vektoriellen Feldkonzepte verwendet, die sich aus den Integralsätzen von Gauß,

$$\iiint_V dV \operatorname{div} \vec{v} = \oiint_{\partial V} d\vec{A} \cdot \vec{v} \quad \{4\}$$

(für ein Volumen V mit der Oberfläche ∂V , dem Volumendifferential dV und dem vektoriellen Flächendifferential $d\vec{A}$), und Stokes,

$$\iint_A d\vec{A} \cdot \operatorname{rot} \vec{v} = \oint_{\partial A} d\vec{l} \cdot \vec{v} \quad \{5\}$$

(für eine Fläche A mit der Randkurve ∂A , dem Flächendifferential $d\vec{A}$ und dem vektoriellen Wegelement $d\vec{l}$), ergeben. Der Gauß'sche Integralsatz verbindet dabei die Divergenz eines Vektorfeldes und den Fluss durch eine Randfläche, während der Stokes'sche Integralsatz eine Relation zwischen der Rotation eines Vektorfeldes und der Zirkulation entlang einer Randkurve herstellt. In diesen Sätzen und den daraus resultierenden Zusammenhängen werden die wesentlichen Eigenschaften von Vektorfeldern zusammengefasst.

Physikspezifische Betrachtungsweisen zur Förderung des Formelverständnisses

Julia Hofmann*, Pascal Klein*, Andreas Müller⁺, Josefine Neuhaus*

*Georg-August-Universität Göttingen, Physik und ihre Didaktik, Friedrich-Hund-Platz 1, 37077 Göttingen,

⁺Université de Genève, Department of Physics, Boulevard du Pont-d'Arve 40a, 1211 Genève, Schweiz
julia.hofmann@uni-goettingen.de

Kurzfassung

Ein tiefgreifendes Verständnis mathematischer Gleichungen und Formeln sowie der Umgang damit sind zentrale Ziele des Physikstudiums. Ein adäquater Umgang mit Formeln beinhaltet deren Analyse, kritische Bewertung und Überprüfung der Plausibilität vor dem Hintergrund des physikalischen Kontexts. Für die Physik typische Methoden und Denkweisen, die dabei häufig Anwendung finden, sind das Betrachten von Dimensionen, Kovariationen sowie von Spezial- und Grenzfällen. Obwohl derartige Betrachtungsweisen von Lehrenden als essenziell erachtet werden, werden diese in der Regel selten explizit in Lehrveranstaltungen vermittelt und eingeübt. Aus diesem Grund wurden bestehende Übungsaufgaben um die genannten Betrachtungsweisen angereichert und im begleitenden Übungsbetrieb einer Elektromagnetismus-Vorlesung für Zweitsemesterstudierende implementiert. Die eingesetzten Aufgaben zielten darauf ab, die kritische Reflexion von Formeln zu unterstützen und zu fördern. Die Studierenden sollten dafür ihre selbstständig hergeleiteten Formeln vor dem Hintergrund der physikalischen Situation überprüfen und eine Aussage über deren physikalische Plausibilität treffen. Die Wirksamkeit der Implementation dieser Aufgaben wurde im Rahmen einer begleitenden Interventionsstudie untersucht und evaluiert. Dieser Beitrag gibt einen Einblick in die Gestaltung und Konzeption der eingesetzten Übungsaufgaben, deren fachdidaktischen Hintergrund, sowie erste Ergebnisse der Bearbeitungen durch die Studierenden.

1. Einleitung

Im Physikstudium werden umfangreiche Kompetenzen und vielschichtiges Wissen vermittelt. Studierende erlernen bspw. experimentelle Fähigkeiten oder eignen sich fachspezifisches Wissen über physikalische Phänomene an. Als „abstrakte Sprache“ der Physik, nimmt auch die Mathematisierung einen hohen Stellenwert im Physikstudium ein. Studierende müssen Zusammenhänge mathematisch beschreiben, Berechnungen durchführen, Formeln herleiten und Vorhersagen auf Grundlage von mathematischen Modellen treffen können. Ein angemessenes Verständnis von Formeln und Gleichungen ist in diesem Kontext unverzichtbar (Redish, 2021). Es wird erwartet, dass Studierende ein Verständnis für mathematische Ausdrücke und Formeln entwickeln, das über die reine Nutzung als mathematisches Werkzeug hinausgeht (Redish & Kuo, 2015). Somit ist es unter anderem von zentraler Bedeutung, dass Formeln stets kritisch hinterfragt und evaluiert werden. Jedoch ist diese Vorgehensweise nicht selbstverständlich: In einer Studie von Wilcox et al. (2013) wurde herausgefunden, dass lediglich 8% der Studierenden am Ende eines Problemlöseprozesses ihr Ergebnis bzw. die Formel selbstständig überprüfen.

Nicht nur in der Schule wird die Mathematisierung als sehr herausfordernd angesehen (Uhlen, 2016), sondern auch im Studium werden besonders die Veranstaltungen zu mathematischen Methoden und Grundlagen als besonders anspruchsvoll erachtet (Lahme et al., 2024). Von Studierenden wird erwartet, dass sie zum Ende ihres Studiums über die

Fähigkeit verfügen, mit mathematischen Ausdrücken adäquat umzugehen. Dies schließt ein, Formeln einer kritischen Prüfung unterziehen und diese mit der zugrundeliegenden physikalischen Situation verknüpfen zu können.

2. Physikspezifische Betrachtungsweisen

Beim Formelverständnis spielt das sog. Sense-Making (Odden & Russ, 2019) eine wichtige Rolle: Es beschreibt einen dynamischen Prozess etwas herauszufinden („to figure something out“), um eine bestehende Lücke bzw. Unzulänglichkeit im eigenen Verständnis zu schließen. Konkret werden Wissensbausteine, wie z. B. mathematische Modelle und Operationen und physikalische Inhalte oder Alltagswissen, miteinander in Verbindung gebracht. Einer Formel wird durch diese Verknüpfung von physikalischen Zusammenhängen mit mathematischen Ausdrücken eine Bedeutung zugeschrieben bzw. ein Sinn verliehen (Sense-Making).

Studien weisen darauf hin, dass es einige Strategien gibt, die diesen Prozess des Sense-Makings positiv beeinflussen können und einen großen Mehrwert für den aktiven und flexiblen Umgang mit physikalischen Formeln haben (Lenz, 2020; Hahn et al., 2018, White et al., 2023). Hierzu zählen bspw. die Betrachtung von Dimensionen, Kovariationen sowie Spezial- und Grenzfällen. Die Betrachtung von Dimensionen (bzw. Einheiten) basiert auf dem Prinzip, dass auf beiden Seiten einer Formel dieselben Dimensionen (bzw. Einheiten) stehen müssen. Bei der Kovariationsbetrachtung wird die gemeinsame Veränderung

zweier Variablen (je-desto- und skaliert-wie-Beziehungen) untersucht. Werden kontextrelevante spezielle Werte einer Variablen ausgewählt und in eine Formel eingesetzt, spricht man von der Betrachtung eines Spezialfalls. Bei der Grenzfallbetrachtung wird ein Grenzwert einer Formel für eine Variable bestimmt, die einen kritischen Wert annimmt. Durch das Anwenden dieser Betrachtungsweisen wird im Sinne des Sense-Makings eine Formel vor dem Hintergrund der physikalischen Situation betrachtet und bewertet, ob diese physikalisch plausibel ist. Selbstverständlich existieren auch viele weitere Betrachtungsweisen (häufig auch Sense-Making-Strategien oder Evaluationsstrategien), die jedoch in dem vorliegenden Beitrag nicht weiter beleuchtet werden. Beispielsweise die Überprüfung der Größenordnung eines Ergebnisses, Symmetrieüberlegungen oder Visualisierungen (Lenz, 2020; Loverude, 2015; Warren, 2010; Friege, 2001).

Diese Herangehensweisen werden sowohl in Fachliteratur häufig angewendet (z. B. Griffith, 2013) als auch von Expert:innen als essenziell für das Physikstudium erachtet (Lenz & Gire, 2016). Eine Befragung unter 32 Lehrenden der Universität Göttingen ergab, dass die oben genannten Betrachtungsweisen unverzichtbare Werkzeuge für Physiker:innen darstellen und sie den Studierenden ein tieferes Verständnis von physikalischen Situationen ermöglichen.

Im Allgemeinen wird von Studierenden erwartet, diese Herangehensweisen im Verlauf des Studiums zu erlernen. Allerdings werden diese in der Regel nicht explizit in Lehrveranstaltungen integriert und gelehrt. Es liegen jedoch Hinweise vor, dass die Betrachtungsweisen im Rahmen universitärer Veranstaltungen durchaus ein Förderpotenzial aufweisen (Lenz, 2020; Loverude, 2015; Warren, 2010; White et al., 2023; Sikorski et al., 2017).

3. Fachdidaktischer Hintergrund

In diesem Abschnitt werden die fachdidaktischen Grundlagen beleuchtet, die der Konzeption von Übungsaufgaben zugrunde liegen, die auf eine Implementation von physikspezifischen Betrachtungsweisen in die universitäre Lehre abzielen. Zunächst wird die Übung als Innovationsort diskutiert und anschließend ein Worked Example-Ansatz als didaktisches Element der Vermittlung beleuchtet. Im Anschluss werden Forschungsarbeiten angeführt, die bereits Ansätze verfolgten physikspezifische Betrachtungsweisen in Lehrveranstaltungen zu integrieren.

3.1. Innovationspotenzial von Übungen in der universitären Lehre

In universitären Veranstaltungen bietet insbesondere der den Vorlesungen zugeordnete Übungsbetrieb einen wertvollen Rahmen, in dem Studierende ihr neu erworbenes Wissen vertiefen, anwenden und eigenständig weiterentwickeln können. Finkelstein und Pollock (2005) konnten in einer Studie zeigen, dass

der Einsatz von Übungsaufgaben (sog. Tutorials) in den begleitenden Übungseinheiten zu einem signifikanten Lernzuwachs bei den Studierenden in Physikveranstaltungen in der Studieneingangsphase führte. Neben dem konzeptuellen Verständnis wurden auch die Überzeugungen der Studierenden im Hinblick auf das Physiklernen und die Physik als Wissenschaft positiv beeinflusst und realistischer im Sinne der Überzeugungen von Physiker:innen. Im Gegensatz zur häufig rezeptiven Wissensvermittlung in Vorlesungen (Weiß & Friege, 2021), ermöglichen Übungen eine aktive Auseinandersetzung mit den Inhalten und fördern damit die aktive Wissenskonstruktion. Vor diesem Hintergrund erscheinen Übungen als besonders geeignet, um innovative didaktische Konzepte zu integrieren.

3.2. Worked Examples

Worked Examples (zu deutsch: „ausgearbeitete Lösungsbeispiele“) stellen insbesondere beim Erlernen neuer Konzepte ein wirksames didaktische Mittel dar (Renkl, 2014). Hierbei wird nach einem expertenhaften Vorgehen schrittweise ein Lösungsweg und auch die zugehörige Lösung zu einem Problem expliziert (Atkinson et al., 2000). Besonders zu Beginn eines Lernprozesses zeigt sich für Noviz:innen durch Worked Examples ein hohes Potenzial im Vergleich zum eigenständigen Problemlösen, da hierdurch das Arbeitsgedächtnis entlastet werden kann und sich Lernende auf das Verstehen konzentrieren können (Sweller & Cooper, 1985). Zusätzlich legen Van Gog et al. (2004) nahe, dass neben produktorientierten Informationen besonders prozessorientierte Informationen in Worked Examples behandelt werden sollten, um Verstehens- und Lernprozesse zu unterstützen. Der Einsatz von Worked Examples im Lernsetting des Example-Based-Learnings wird nach Wittwer und Renkl (2010) in drei Schritte gegliedert: Zunächst wird eine allgemeine Einführung in die Konzepte vorgestellt, woraufhin eine tiefere Auseinandersetzung der Lernenden mit entsprechenden Worked Examples folgt. Hieran schließt sich eine Lernphase an, in der Lernende selbstständig Probleme lösen sollen. Zahlreiche Studien zeigen, dass ein solcher Ansatz im Vergleich zum reinen Problemlösen effektiver ist (ebd.).

3.3. Förderungsansätze

Bisher liegen nur wenige Untersuchungen vor, die eine Implementation physikspezifischer Betrachtungsweisen zum Formelverständnis im universitären Kontext in den Blick nehmen. Obwohl es Hinweise auf die Wirksamkeit dieses Ansatzes innerhalb des Übungsbetrieb gibt, wurde bislang keine systematische Untersuchung im Sinne einer kontrollierten Interventionsstudie durchgeführt.

White et al. (2023) setzten Aufgaben in einem Kurs zur Elektrizitätslehre und Magnetismus zur Überprüfung von Formeln ein. Im Rahmen der regelmäßigen Übungsaufgaben wurden die Studierenden dazu

aufgefordert die Formeln mit physikspezifischen Betrachtungsweisen einer kritischen Analyse zu unterziehen und zu entscheiden, ob die Formel „Sinn ergibt“. Neben der Betrachtung von Spezialfällen und Dimensionen standen Grenzfälle im Fokus der Überprüfungen: „Show that the formula makes sense in the limit as the charge goes to zero, explaining why the mathematical answer matches your intuition about what the tension should be when there is no charge“ (White et al., 2023, S. 15). Im Rahmen der Implementation dieser Aufgaben konnten Einblicke in die Vorgehensweise der Studierenden bei der Überprüfung physikalischer Formeln gewonnen werden. Die Untersuchung ergab, dass viele der Studierenden in ihrer Betrachtung einen algorithmischen, formalen bzw. manipulativen Ansatz verfolgten, ohne zu reflektieren, ob die Betrachtung vor der physikalischen Situation standhält und die Formel somit plausibel ist. Die Studierenden fokussierten sich zudem bei der eigenständigen Auswahl von Grenzfällen besonders auf bekannte Variablen (bspw. Abstände, Geschwindigkeiten) und weniger auf Konstanten (bspw. μ_0 , g).

In Studien von Hahn et al. (2018) wurde in ähnlicher Weise die Anwendung von Sense-Making-Strategien in universitären Mechanik-Veranstaltungen implementiert. Über eingebettete „Sense-Making-Aufgaben“ in traditionellen Übungsaufgaben, sollte die Anwendung der Betrachtung von Dimensionen, funktionalen Abhängigkeiten (im Sinne von Kovariationen), Grenz- und Spezialfällen sowie graphischen Analysemethoden geübt werden: „Sense-Making: Consider Special Cases. Does your result for the maximum range make sense if the ground is horizontal? If the ground is vertical (like right up against a cliff)?“ (Hahn et al., 2018, S. 161). Nach der Hälfte des Kurses wurden die Aufgaben mittels Fading (Rosenshine & Meister, 1992) mit weniger spezifischen Vorgaben gestellt: „Use at least two sense-making strategies to make sense out of this equation“ (Hahn et al., 2018, S. 161) bis hin zu einer weiteren Reduktion: „Be sure to do some sense-making around your result.“ (ebd., S. 161). Die Autor:innen fanden heraus, dass Studierende besonders häufig Dimensionen und Spezialfälle betrachteten, wenn keine Strategie zur Anwendung vorgegeben wurde (s. Fading-Aufgaben). Die Betrachtung von funktionalen Abhängigkeiten und insbesondere Grenzfällen fand hingegen weniger Anwendung in diesem Szenario.

In einer Studie von Warren (2010) wurden Strategien zur Evaluation von Ergebnissen und Formeln in einem Mechanik-Kurs an einer Universität gelehrt, um die Reflexion eigener Ergebnisse und zusätzlich die Problemlösefähigkeit zu fördern. Klassische Präsenz- sowie Hausaufgaben wurden hierfür mit Aufgaben zur Evaluation angereichert. Den Studierenden wurden im Rahmen der Evaluationsaufgaben bspw. eine fehlerhafte Herleitung zu einem Objekt auf einer schiefen Ebene von einem Kommilitonen (Scooter) präsentiert, das in mehreren Teilschritten überprüft

werden sollte: „Do a special-case analysis of Scooter’s solution: Choose a special case of the situation for which you conceptually know what the answer should be (Hint: For which values of θ can you say exactly what a_x should be?)“ (Warren, 2010, Supplemental Material, S. 3). Im Anschluss daran wurde abgefragt, ob das Ergebnis plausibel ist: „Explain why Scooter’s answer does/does not make sense for this special case.“ (ebd., S. 3). In den meisten Fällen wurde vorgegeben, ob Dimensionen oder Spezialfälle betrachtet werden sollen. Teilweise wurden Aufgaben eingesetzt, in denen eigene Herleitungen von Formeln überprüft werden sollten: „Test your solutions [...] by doing a special-case analysis.“ (ebd., S. 13). Nach dem Kurs zeigten die Studierenden ein tieferes Verständnis und eine verbesserte Anwendung von Evaluationsstrategien, woraufhin der Autor schlussfolgert, dass eine Förderung der Strategien durchaus möglich sei. Zusätzlich verbesserten sich die Problemlösefähigkeiten der Studierenden nach Absolvierung des Kurses.

Es wurden bereits vereinzelt physikspezifische Betrachtungsweisen untersucht, jedoch meist auf einer deskriptiven Ebene und nicht in einem kontrollierten Setting. Die vorliegende Arbeit setzt hier an und nimmt gezielt die Implementation der Betrachtungsweisen deren Beforschung im universitären Regelbetrieb in den Fokus. Damit wird ein substanzieller Beitrag zur evidenzbasierten Förderung von Formelverständnis im Physikstudium geleistet.

4. Materialentwicklung: Aufgaben zur Förderung von physikspezifischen Betrachtungsweisen

Vor dem Hintergrund der didaktischen Überlegungen im vorherigen Kapitel wurden Übungsaufgaben konzipiert. Begleitend zu einer Elektromagnetismus-Vorlesung wurden wöchentliche Übungszettel, die für die Prüfungsvorleistung der Studierenden relevant waren, um physikspezifische Betrachtungsweisen (Betrachtung von Dimensionen, Kovariationen, Spezial- und Grenzfällen) angereichert. Im Rahmen von Übungsgruppen wurden die Aufgaben wöchentlich besprochen und von Tutor:innen korrigiert. Zur Untersuchung der Wirksamkeit der Übungsaufgaben, wurden zwei Interventionsgruppen gebildet, die jeweils zwei der vier Betrachtungsweisen über einen Zeitraum von sieben Wochen einübten. Die Übungsaufgaben wurden demnach so gestaltet, dass dieselben Formeln, abhängig von der Interventionsgruppe, mit einer Dimensions- und Kovariationsbetrachtung (s.u. Variante A) oder einer Spezial- und Grenzfallbetrachtung (s.u. Variante B) überprüft werden sollten.

Zu Beginn des Semesters wurden die Betrachtungsweisen gemäß des Example-Based-Learnings (Wittwer & Renkl, 2010) zunächst in den Übungsgruppen anhand von Worked Examples eingeführt und detailliert besprochen. Den Studierenden wurde darüber hinaus ein Leitfaden zur Verfügung gestellt, der als Orientierungshilfe diente. Dieser enthielt grundsätzliche Erläuterungen und ausführliche und schrittweise

Erklärungen zu den verschiedenen Betrachtungsweisen (im Sinne von Worked Examples).

Die Übungsaufgaben wurden in Anlehnung an die vorgestellten Vorarbeiten und deren Erkenntnisse (vgl. Kapitel 3.3) konzipiert. Bei Interesse besteht die Möglichkeit einen Zugang zum Material zu erhalten. Die Studierenden wurden in Übungsaufgaben dazu aufgefordert, die im Vorfeld selbst hergeleiteten Formeln (bspw. zu einem elektrischen Feld eines unendlich dünnen und langen Leiters) auf ihre physikalische Plausibilität hin zu überprüfen. Im Zuge der Überprüfung wurde eine der vier Betrachtungsweisen vorgegeben. Die Arbeitsaufträge waren für jede der vier Betrachtungsweisen gleich strukturiert:

Überprüfen Sie die im vorherigen Aufgabenteil hergeleitete Formel für die entsprechende physikalische Größe, indem Sie die Dimensionen/eine Abhängigkeit/einen Spezialfall/einen Grenzfall für die physikalische Situation betrachten. Ist auf Grundlage Ihrer Betrachtung die Formel physikalisch plausibel?

Für die Analyse von Kovariationen, Spezial- und Grenzfällen wurde jeweils eine Abhängigkeit bzw. ein spezieller (Grenz-)Fall vorgegeben, um die Studierenden in der Wahl eines relevanten Parameters zu entlasten. In vorherigen Untersuchungen stellte sich heraus, dass besonders die Auswahl adäquater und relevanter Spezial- und Grenzfälle eine Herausforderung für Studierende darstellt (White et al., 2023).

In Anlehnung an Hahn et al. (2018) wurde im Verlauf des Semesters ein Fading (Rosenshine & Meister, 1992) der Aufgabenstellung für die Betrachtung von Kovariationen, Spezial- und Grenzfällen durchgeführt (redundant in Bezug auf die Dimensionsbetrachtung). Die Studierenden sollten im Rahmen des Fadings selbst eine Auswahl von relevanten Variablen treffen und daraufhin eine hergeleitete Formel kritisch untersuchen. Im Anschluss wurden die Studierenden wieder dazu aufgefordert eine Begründung zur physikalischen Plausibilität der Formel auf Grundlage der Untersuchung zu treffen:

Überprüfen Sie die im vorherigen Aufgabenteil hergeleitete Formel für die entsprechende physikalische Größe, indem Sie eine relevante Abhängigkeit/einen relevanten Spezialfall/einen relevanten Grenzfall auswählen und betrachten. Ist auf Grundlage Ihrer Betrachtung die Formel physikalisch plausibel?

Auf ein weiteres Fading (vgl. Hahn et al., 2018) der Aufgabenstellung wurde mit Blick auf das Forschungsinteresse der begleitenden Interventionsstudie verzichtet.

Infolge von vorangegangenen Pilotierungen der Aufgabenstellung wurde in allen Phasen des Fadings die Frage „Ist auf Grundlage Ihrer Betrachtung die Formel physikalisch plausibel?“ hinzugefügt. Bei früheren Bearbeitungen wurde festgestellt wurde, dass nur wenige Studierende eine explizite Begründung

angaben und sich diese in der Regel auf einzelne Wörter wie „plausibel“ oder „passt“ beschränkte. Die explizite Aufforderung zur Begründung zielte darauf ab, eine tiefere Auseinandersetzung der Formel mit dem physikalischen Hintergrund anzuregen, um sinnverstehende Denkprozesse anzustoßen.

Ein Beispiel für die Anwendung der Dimensions- und Kovariationsbetrachtung im Kontext kontinuierlicher Ladungsverteilungen ist folgendes:

Variante A

Aufgabe: Coulomb-Wechselwirkung kontinuierlicher Ladungsverteilungen

In dieser Aufgabe vergleichen Sie elektrische Felder unterschiedlicher Ladungsträgerverteilungen.

- Betrachten Sie das elektrische Feld für eine unendlich lange, unendlich dünne homogene Linienladungverteilung entlang der x-Achse: $\lambda(\vec{r}) = \lambda_0 \delta(y) \delta(z)$.
- Überprüfen Sie die in a) hergeleitete Formel für das elektrische Feld einer Linienladungverteilung, indem Sie eine Dimensions- oder Einheitenanalyse durchführen. Ist auf Grundlage Ihrer Analyse die Formel physikalisch plausibel?
- Betrachten Sie das elektrische Feld entlang der z-Achse für einen unendlich dünnen kreisförmigen Ring mit Radius R mit homogener Linienladungsdichte in der x-y-Ebene: $\lambda(\vec{r}) = \lambda_0 \delta(r - R) \delta(z)$.
- Überprüfen Sie die in c) hergeleitete Formel, indem Sie das elektrische Feld in Abhängigkeit von dem Beobachtungsort (in z-Richtung) betrachten. Ist auf Grundlage Ihrer Betrachtung die Formel physikalisch plausibel?

(Hinweis: Sie können jederzeit im Leitfadendokument in der Übungsveranstaltung nachlesen, wie Sie bei der Betrachtung von Dimensionen, Kovariationen, Spezial- und Grenzfällen vorgehen können.)

Für das Überprüfen derselben Formeln im selben Kontext mit Hilfe von Grenz- und Spezialfällen wurde eine analoge Formulierung eingesetzt:

Variante B

Aufgabe: Coulomb-Wechselwirkung kontinuierlicher Ladungsverteilungen

In dieser Aufgabe vergleichen Sie elektrische Felder unterschiedlicher Ladungsträgerverteilungen.

- Betrachten Sie das elektrische Feld für eine unendlich lange, unendlich dünne homogene Linienladungverteilung entlang der x-Achse: $\lambda(\vec{r}) = \lambda_0 \delta(y) \delta(z)$.
- Überprüfen Sie die in a) hergeleitete Formel des elektrischen Feldes, indem Sie den Grenzfall eines weit entfernten Beobachtungsorts betrachten.

Ist auf Grundlage Ihrer Betrachtung die Formel physikalisch plausibel?

- c) Betrachten Sie das elektrische Feld entlang der z-Achse für einen unendlich dünnen kreisförmigen Ring mit Radius R mit homogener Linienladungsdichte in der x-y-Ebene: $\lambda(\vec{r}) = \lambda_0 \delta(r - R) \delta(z)$.
- d) Überprüfen Sie die in c) hergeleitete Formel des elektrischen Feldes, indem Sie den Spezialfall für einen minimalen Radius des Rings betrachten. Betrachten Sie dabei eine konstante Ladungsdichte $\lambda_0 = q/(2\pi R)$. Ist auf Grundlage Ihrer Betrachtung die Formel physikalisch plausibel?

(Hinweis: Sie können jederzeit im Leitfadendokument in der Übungsveranstaltung nachlesen, wie Sie bei der Betrachtung von Dimensionen, Kovariationen, Spezial- und Grenzfällen vorgehen können.)

5. Einblicke in Bearbeitungen von Studierenden

Die Bearbeitungen der Studierenden variierten stark in deren Ausführlichkeit und Qualität. Die Mehrheit der Studierenden bearbeitete die Aufgaben gewissenhaft und kam gut mit der Aufgabenstellung zurecht. In den folgenden Abbildungen (Abb. 1 - 4) sind Einblicke in unterschiedliche Bearbeitungen zur oben vorgestellten Aufgabe abgebildet. Die Bearbeitungen wurden in der dritten Semesterwoche angefertigt, d.h. zu diesem Zeitpunkt waren die Studierenden mit den jeweiligen Betrachtungsweisen bereits vertraut. Im Folgenden wird eine Auswahl von Bearbeitungen präsentiert, die jedoch keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt und nicht auf quantitativen Analysen basiert.

Die Ausführung der Betrachtung von Dimensionen bzw. Einheiten von Formeln erfolgte weitestgehend korrekt (vgl. Abb. 1). In einigen Fällen kam es zu Schwierigkeiten beim Einsetzen von den korrekten Einheiten in die Formel oder zu Vermischungen in der Notation von Formelzeichen/Variablen und zugehörigen Einheiten (Einheitenklammern).

$$b) \quad E = \frac{\lambda_0}{2\pi\epsilon_0} \Rightarrow \frac{\frac{C}{m}}{\frac{C}{V \cdot m}} = \frac{C}{m} \cdot \frac{V \cdot m}{C} = \frac{1}{m} \cdot V = \frac{V}{m} \Rightarrow \text{Richtig}$$

Abb. 1: Studierendenbearbeitung einer Dimensionsbetrachtung.

Bei der Anwendung von Spezial- und Grenzfällen (Abb. 2 und 3) zeigte sich besonders auf den ersten Übungszetteln häufig eine diffuse Notation, die mit einer Verwechslung von Spezial- und Grenzfällen einherging. Es wurde insbesondere nicht die mathematisch korrekte Schreibweise beachtet, was zur Folge hatte, dass ein Spezialfall (z. B. $R = 0$) teilweise in Grenzfallnotation ($\lim_{R \rightarrow 0}$) betrachtet wurde. Für Folgestudien wäre es demnach empfehlenswert, auf den Unterschied zwischen den zwei

Betrachtungsweisen bspw. im Leitfaden und auch in den Übungsgruppen explizit hinzuweisen.

Die Betrachtung des Spezialfalls in Abb. 2 kann als gelungen betrachtet werden. Die Begründung ist bereits ausführlich, jedoch besteht noch Potenzial für eine vertiefte Auseinandersetzung. Die in Abb. 3 dargestellte Grenzfallbetrachtung zeigt hingegen eine sehr knappe (jedoch durchaus korrekte) Bearbeitung. Im Allgemeinen aber lieferten die Studierenden bei der Betrachtung von Kovariationen, Spezial- und Grenzfällen teilweise keine oder nicht qualitativ hochwertige Begründungen. Häufig wurden lediglich die Phrasen „passt so“, „plausibel“ oder „√“ als Begründung angegeben, obwohl explizit nach der Einordnung gefragt wurde („Ist auf Grundlage Ihrer Betrachtung die Formel physikalisch plausibel?“). Elaboriertere Begründungsmuster, die explizit vorherige Kenntnisse bzw. Informationen der zugrundeliegenden physikalischen Situation oder auch der eigenen Intuition berücksichtigten, wurden seltener beobachtet. Die Bearbeitung in Abb. 4 zeigt hingegen eine ausführliche Einordnung der Untersuchung der Abhängigkeit des elektrischen Feldes von der z-Koordinate.

$$d) \quad R=0 \quad \lambda_0 = \frac{q}{2\pi R}$$

$$\Rightarrow \vec{E} = \frac{qR}{2\epsilon_0(R^2+a^2)^{3/2}} \hat{e}_z = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 a^2} \hat{e}_z$$

Das ist plausibel, denn das elektrische Feld ist für eine Punktladung $\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2}$ und in diesem Fall ist $r=a$.

Abb. 2: Studierendenbearbeitung einer Spezialfallbetrachtung $R = 0$.

$$b) \quad \lim_{a \rightarrow \infty} E = 0 \quad \Rightarrow \text{Physikalisch plausibel}$$

Abb. 3: Studierendenbearbeitung einer Grenzfallbetrachtung für einen unendlich entfernten Beobachtungsort.

a) Das el. Feld entlang der z-Achse hängt nur von der z-Koordinate ab und geht radial von z aus. Dies ist physikalisch plausibel, da das el. Feld eines kreisförmigen Rings entlang seiner Symmetrieachse radial ausgerichtet ist und mit zunehmender Entfernung vom Ring abnimmt.

Abb. 4: Studierendenbearbeitung einer Kovariationsbetrachtung des elektrischen Feldes in Abhängigkeit des Beobachtungsorts z.

In Kontrast zur Bearbeitung in Abb. 4 fiel auf, dass manche Studierenden einen Grenzfall nicht in mathematischer Grenzfallnotation betrachteten, sondern eine (korrekte) qualitative Beschreibung des Verhaltens vornahmen. Die qualitativen Beschreibungen zeigten vermehrt eine starke Ähnlichkeit zu einer Kovariationsbetrachtung, da auf die gemeinsame Veränderung zweier Variablen eingegangen wurde. Darüber hinaus wurde bei diesen beiden Betrachtungsweisen eine starke Ähnlichkeit in den

Begründungsmustern festgestellt, die sich insbesondere in der Beschreibung von je-desto-Beziehungen äußerte. Auffällig ist zudem, dass bei der Betrachtung von Kovariationen teilweise auch Grenzfälle betrachtet wurden.

6. Fazit und Ausblick

Die präsentierten Aufgaben zielen darauf ab physikspezifische Betrachtungsweisen explizit in Lehrveranstaltungen zu implementieren, um die Verknüpfung von mathematischen Darstellungen mit physikalischen Konzepten und damit einhergehend das Verständnis für physikalische Formeln zu fördern. Im Fokus stehen dabei die Betrachtung von Dimensionen, Kovariationen, Spezial- und Grenzfällen.

Die studentischen Bearbeitungen bieten vielfältige Einblicke in den Umgang mit physikspezifischen Betrachtungsweisen. Auf dieser Grundlage können die Aufgaben kontinuierlich verbessert und erweitert werden. Um beispielweise detailliertere Begründungen einzufordern, bietet es sich an zwei getrennte Arbeitsaufträge zu formulieren, bei denen – analog zum zweistufigen Testformat (Treagust, 2006) – in zwei Teilschritten die Anwendung und anschließende Begründung abgefragt werden. Durch die damit einhergehende explizite Bewertung nicht nur von der reinen Anwendung, sondern auch der Begründung, können die Studierenden dazu ermutigt werden sich noch intensiver mit der Verknüpfung von mathematischem Ausdruck und physikalischem Kontext auseinanderzusetzen. Angereichert um einen weiteren Fading-Schritt (vgl. Hahn et al., 2018: „Use at least two sense-making strategies to make sense out of this equation“) könnte zudem der Auswahlprozess geeigneter Betrachtungsweisen in den Blick genommen werden: Welche Betrachtungsweisen bevorzugen Studierende und welche bieten sich in spezifischen Kontexten bzw. bei spezifischen Formeln besonders an?

Die vorgestellten Aufgaben wurden bereits in einer Interventionsstudie eingesetzt, um die Wirksamkeit des Förderungsansatzes zu untersuchen. Für eine differenzierte Evaluierung wurden Leistungstests und Fragebögen (Zielvariablen: Relevanz und wahrgenommene Kompetenz im Hinblick auf die vier Betrachtungsweisen) eingesetzt. Die Datenerhebung erfolgte im Sommersemester 2024 in einer Zweitsemesterveranstaltung zum Themengebiet Elektromagnetismus (für einen Einblick in die Intervention s. Hofmann et al., 2024). Ein zentrales Anliegen der Studie bestand darin zu untersuchen, ob die Leistung und auch die wahrgenommene Kompetenz der Studierenden durch die Implementation der Aufgaben in den Übungsbetrieb gesteigert werden konnten. Erste Analysen deuten darauf hin, dass die Intervention positive Effekte aufweist. Diese Ergebnisse unterstreichen das Potenzial physikspezifischer Betrachtungsweisen als didaktisches Werkzeug in der universitären Lehre und legen nahe, dass deren systematische

Integration in Übungsformaten einen vielversprechenden Beitrag zur Förderung leisten kann.

7. Literatur

- Atkinson, R. K., Derry, S. J., Renkl, A., & Wortham, D. (2000). Learning from Examples: Instructional Principles from the Worked Examples Research, *Review of educational research*, 70(2), 181-214.
- Friege, G. (2001). Wissen und Problemlösen. Eine empirische Untersuchung des wissenszentrierten Problemlösens im Gebiet der Elektrizitätslehre auf der Grundlage des Experten-Novizen-Vergleichs. Logos Verlag Berlin.
- Griffiths, D. J. (2013). *Introduction to electrodynamics* (4. Auflage). Pearson.
- Hahn, K. T., Emigh, P. J., Lenz, M., & Gire, E. (2018). Student sense-making on homework in a sophomore mechanics course. *2017 Physics Education Research Conference Proceedings*, 160–163.
- Hofmann, J., Neuhaus, J., Müller, A., & Klein, P. (2024). Förderung des Formelverständnisses durch physikspezifische Strategien. *GDCP-Jahrestagung 2024*.
- Lahme, S. Z., Cirkel, J. O., Hahn, L., Hofmann, J., Neuhaus, J., Schneider, S., & Klein, P. (2024). Enrollment to exams: Perceived stress dynamics among first-year physics students. *Physical Review Physics Education Research*, 20(2).
- Lenz, M. (2020). *Sensemaking Throughout the Physics Curriculum: Understanding Expert and Student Ideas About Sensemaking in a Physics Context* [Dissertation, Oregon State University].
- Lenz, M., & Gire, E. (2016). Faculty views of and expectations for dimensional analysis. *2016 Physics Education Research Conference Proceedings*, 196-199.
- Loverude, M. E. (2015). Quantitative reasoning skills in math methods. *2015 Physics Education Research Conference Proceedings*, 203–206.
- Odden, T. O. B., & Russ, R. S. (2019). Defining sense-making: Bringing clarity to a fragmented theoretical construct. *Science Education*, 103(1), 187–205.
- Redish, E. (2021). Using Math in Physics: Overview. *The Physics Teacher*, 59(5), 314–318.
- Redish, E. F., & Kuo, E. (2015). Language of Physics, Language of Math: Disciplinary Culture and Dynamic Epistemology. *Science & Education*, 24, 561–590.
- Renkl, A. (2014). Toward an Instructionally Oriented Theory of Example-Based Learning. *Cognitive Science*, 38(1), 1–37.
- Rosenshine, B., & Meister, C. (1992). The Use of Scaffolds for Teaching Higher-Level Cognitive Strategies. *Educational Leadership*, 49(7), 26–33.
- Sikorski, T.-R., White, G., Landay, J. (2017). Uptake of solution checks by undergraduate physics

- students. 2017 Physics Education Research Conference Proceedings, 368-371.
- Sweller, J., & Cooper, G. A. (1985). The Use of Worked Examples as a Substitute for Problem Solving in Learning Algebra. *Cognition and Instruction*, 2(1), 59–89.
- Treagust, D. F. (2006). Diagnostic assessment in science as a means to improving teaching, learning and retention. *Proceedings of The Australian Conference on Science and Mathematics Education*.
- Uhden, O. (2016). Verständnisprobleme von Schülerinnen und Schülern beim Verbinden von Physik und Mathematik. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 22(1), 13–24.
- Van Gog, T., Paas, F., & Van Merriënboer, J. J. G. (2004). Process-Oriented Worked Examples: Improving Transfer Performance Through Enhanced Understanding. *Instructional Science*, 32(1), 83–98.
- Warren, A. R. (2010). Impact of teaching students to use evaluation strategies. *Physical Review Special Topics – Physics Education Research*, 6(2).
- Weiß, L.-F., & Friege, G. (2021). The flipped classroom: Media hype or empirically based effectiveness? *Problems of Education in the 21st Century*, 79(2), 312–332.
- White, G., Sikorski, T.-R., Landay, J., & Ahmed, M. (2023). Limiting case analysis in an electricity and magnetism course. *Physical Review Physics Education Research*, 19(1).
- Wilcox, B. R., Caballero, M. D., Pepper, R. E., & Pollock, S. J. (2013). Upper-division student understanding of Coulomb’s law: Difficulties with continuous charge distributions. *AIP Conference Proceedings*, 1513(1), 418–421.
- Wittwer, J., & Renkl, A. (2010). How Effective are Instructional Explanations in Example-Based Learning? A Meta-Analytic Review. *Educational Psychology Review*, 22, 393–409.

Analyse von Lehrkräfte-Netzwerken und deren Nutzung

Ramona Schauer-Bollig, Heidrun Heinke

RWTH Aachen University, I. Physikalisches Institut IA, Sommerfeldstraße 16, 52074 Aachen
schauer-bollig@physik.rwth-aachen.de

Kurzfassung

Ein wesentlicher Aspekt fachdidaktischer Forschung ist die Weiterentwicklung schulischen Unterrichts. Neben der Entwicklung von Lehrinnovationen zählt dazu insbesondere auch deren gelungene Implementation in der Schulpraxis. Eine zweckdienliche Strategie ist der symbiotische Implementationsansatz, der durch einen Austausch zwischen Wissenschaft und Praxis geprägt ist. Lehrkräfte-Netzwerke mit gleichzeitiger Beteiligung von Akteur:innen aus Hochschulen stellen eine Option dar, einen solchen Austausch zu ermöglichen.

Mit dem Forschungsvorhaben wird der Frage nachgegangen, wie geeignete Rahmenbedingungen für nachhaltig wirksame Lehrkräfte-Netzwerke aussehen können und ob etablierte Netzwerke ein gangbarer Weg sind, physikdidaktische Lehrinnovationen in der Schule erfolgreich zu implementieren. In einem ersten Schritt wurden dafür Lehrkräfte zu deren Nutzung von Netzwerken und dem Angebot eines regionalen Lehrkräfte-Netzwerks befragt, um Beweggründe und Hemmschwellen für eine Teilnahme auszumachen. Die ersten Ergebnisse zeigen, dass zwar ein prinzipielles Interesse an solchen Netzwerken besteht, die tatsächliche Beteiligung daran aber gering ausfällt. Als Ursachen dafür werden vor allem Unkenntnis von Netzwerken und ein negativ wahrgenommenes Aufwand-Nutzen-Verhältnis bei limitierten zeitlichen Ressourcen identifiziert.

1. Motivation

Unterrichtsforschung mit dem Ziel der Optimierung pädagogischer Praxis erfordert auch die Berücksichtigung von Fragen nach der Implementation von Innovationen (Gräsel & Parchmann, 2004). Insbesondere Fragestellungen, wie Forschungsergebnisse verbreitet werden können, was geeignete und weniger taugliche Implementationsstrategien sind und welche Einflussfaktoren sich förderlich oder hemmend auf die Implementation auswirken können, sind dabei von Relevanz (Gräsel & Parchmann, 2004).

Lehrkräfte-Netzwerke gelten als ein günstiger Faktor für eine erfolgreiche (symbiotische) Implementation von Lehrinnovationen, da durch den direkten Kontakt mit Lehrkräften die Wahrscheinlichkeit des Einsatzes der Lehrinnovationen in der Praxis steigt (Hiller, 2009). Die Etablierung einer solchen dauerhaften Kooperationsstruktur wirkt sich somit positiv auf die Implementation aus und ermöglicht gleichzeitig eine langfristige Professionalisierung der Lehrkräfte (Gräsel & Parchmann, 2004). Diese geschieht in mehreren Gebieten und ermöglicht so, durch die Erweiterung der Handlungsspielräume von Lehrkräften der Komplexität des Unterrichtshandelns gerechter zu werden (Gräsel & Parchmann, 2004).

2. Theoretische Grundlagen

2.1. Symbiotische Implementationsstrategie

Unter dem Begriff „symbiotische Implementationsstrategie“ ist die Zusammenarbeit diverser Akteur:in-

nen mit unterschiedlicher Expertise, z. B. aus Wissenschaft und Praxis, bei der Umsetzung von Lehrinnovationen zu verstehen (Gräsel & Parchmann, 2004). Der Austausch und die Kooperation auf Augenhöhe bieten zum einen Vorteile für alle Beteiligten im Sinne der Horizonterweiterung und ermöglichen zum anderen die Berücksichtigung vieler verschiedener Blickwinkel im gesamten Realisierungsprozess von Maßnahmen und Materialien (Gräsel & Parchmann, 2004). Im Gegensatz zu anderen Implementationsstrategien, die eine Trennung zwischen Konzeptions- und Anwendungsebene aufweisen und sich hauptsächlich auf die Dissemination fertiger Konzeptionen konzentrieren, umfasst der symbiotische Implementationsansatz den kompletten Prozess von der Entwicklung über die Verbreitung und die Erprobung bis hin zur Revision, was eine langfristige Zusammenarbeit sowohl fördert als auch erforderlich macht (Gräsel & Parchmann, 2004).

2.2. Was charakterisiert ein Netzwerk?

Allgemein lässt sich ein Netzwerk als ein personenbezogenes Beziehungsgeflecht von Individuen mit gemeinsamen Basisinteressen beschreiben (Berkemeyer, Manitus & Müthing, 2008), dessen wesentliche Merkmale die Interdependenz der Akteur:innen sowie deren vertrauensvoller Austausch untereinander sind (Willke, 1998; Weyer, 2000). Darüber hinaus zeichnen sich Netzwerke durch eine hohe Flexibilität aus (Sydow & Windeler, 1994).

Dieser Kooperationstyp kann hinsichtlich seiner Form und seiner Interessenausrichtung unterschieden

werden. Es wird zwischen privaten Netzwerken sowie Unternehmensnetzwerken differenziert und innerhalb dieser nochmal zwischen Innovationsnetzwerken und strategischen Netzwerken (Aderhold, 2005). Innovationsnetzwerke zielen auf die Generierung neuer Produkte oder Problemlösungen ab, weswegen schulische Netzwerke, deren Interesse auf eine innovative Unterrichtsentwicklung ausgerichtet ist, zu diesem Typ gezählt werden (Jungermann et al., 2018).

2.3. Potentiale von Lehrkräfte-Netzwerken

Netzwerke im Allgemeinen bieten viele potentielle Nutzen, auch wenn Netzwerkarbeit zunächst einen erhöhten Mehraufwand bedeutet und sich Ergebnisse und Erfolge häufig erst mit zeitlichem Abstand einstellen (Jungermann et al., 2018).

Vorteile von Vernetzung sind (Jungermann et al., 2018):

- Austausch und Ideentransfer
- Kompetenzbündelung
- Effizienzsteigerung
- Angebotserweiterung
- Ermöglichung von Lernprozessen
- Sozialer Nutzen

Der Austausch von Erfahrungen, Informationen, Wissen, neuen Methoden und Lösungsstrategien ist bereichernd (Wetzel et al., 2001) und kann zum Transfer von Ideen und Anregungen beitragen (Jungermann et al., 2018). Darüber hinaus bedeutet die Kooperation eine Bündelung von Kompetenzen und Ressourcen (Becker et al., 2007), die eine Effizienzsteigerung ermöglicht, welche die Leistungen eines Einzelnen übersteigen kann (Jungermann et al., 2018). Durch den Zugriff auf ein erweitertes Spektrum an Perspektiven und Mitteln kann ebenfalls eine Erweiterung des Angebots erfolgen (Teller & Longmuß, 2007). All dies ermöglicht die Professionalisierung der im Projekt involvierten Akteur:innen mittels schnellerer und umfassenderer Lernprozesse der Beteiligten (Teller & Longmuß, 2007; Hiller, 2019). Nicht zu vernachlässigen ist auch der soziale Nutzen der Vernetzung sowie der damit einhergehende Gewinn an Erfahrung und Unterstützung (Teller & Longmuß, 2007).

Die speziellen Vorteile interschulischer Netzwerke sind gesondert hervorzuheben. Diese Netzwerke können positive Wirkungen auf die Entwicklung von Lehrkräften, Schulen und Unterricht haben (Jungermann et al., 2018; Haenisch, 2003) und besitzen somit auch einen gesellschaftlichen Output (Hiller, 2019).

Vorteile schulischer Vernetzung sind (Jungermann et al., 2018):

- Professionalisierung der Lehrkräfte
- Organisationale Lernprozesse
- Unterrichtsentwicklung

Die Professionalisierung erfolgt auf unterschiedlichen Ebenen und in verschiedenen Bereichen. Netzwerke mit Beteiligung von Akteur:innen aus Wissenschaft und Praxis sind lernerorientiert, wissensbasiert und bieten Raum für Rückmeldungen und Reflexionen (Haenisch, 2003). Die Unterrichtsnähe entsteht durch die Anknüpfung an die Interessen und Bedürfnisse der Lehrkräfte (Haenisch, 2003). Die unterschiedlichen Expertisen der Beteiligten liefern zum einen Hintergrundwissen und ermöglichen zum anderen die Verknüpfung von pädagogischem Wissen und Wissen aus verschiedenen Fachdisziplinen (Haenisch, 2003). Durch die Zusammenarbeit in solchen Netzwerken wird die Möglichkeit der Kooperation und Reflexion gegeben (Haenisch, 2003), was die Steigerung der Reflexionsfähigkeit zur Folge hat (Rauch et al., 2007). Zusätzlich werden auch die Innovationsbereitschaft gesteigert und Einstellungsänderungen angeregt (Jungermann et al., 2018). Darüber hinaus können die Lehrkräfte ihr Wissen zu organisationalen Strukturen und Prozessen ausbauen (Wohlstetter et al., 2003; Dederich, 2007).

Einhergehend mit der Professionalisierung der Lehrkräfte findet auch eine Entwicklung des Unterrichts statt, indem die im Netzwerk erworbenen Qualifikationen und Innovationen im eigenen Unterricht umgesetzt werden (Altrichter, 2010; Hußmann et al., 2009; Haenisch, 2003).

2.4. Gelingensbedingungen von Netzwerken

Es gibt eine Vielzahl an Bedingungen und Einflussfaktoren, die sich auf das Gelingen von Netzwerken auswirken können. Heinrich (2009) zählt fünf ausschlaggebende auf:

- Zeit
- Vertrauen
- Netzwerkidentität
- Flexible Strukturen
- Autonomie

Der erste Aspekt ist die Zeit. Netzwerkeffekte stellen sich erst mit Verzögerung ein bzw. werden nur mit zeitlichem Abstand von allen Teilnehmenden wahrgenommen (Heinrich, 2009). Vertrauen im Sinne von Verhaltenserwartungen und Berechenbarkeit ist der zweite wichtige Faktor (Heinrich, 2009). Der dritte Punkt ist die Netzwerkidentität. Das bedeutet zum einen die Sichtbarkeit des Netzwerkes mit seinen Leistungen, sowohl nach innen als auch nach außen, und zum anderen einen definierten zeitlichen, räumlichen und/oder virtuellen Ort (Heinrich, 2009). Des Weiteren benötigen Netzwerke flexible Strukturen, die verschiedene Grade an Beteiligung und Engagement der Akteur:innen zulassen (Heinrich, 2009). Das letzte Kriterium ist die Autonomie. Es sollten so viele Verbindlichkeiten wie möglich, aber so wenig Regelungen wie zwingend notwendig vorgegeben werden (Heinrich, 2009).

3. Umfragen zu Lehrkräfte-Netzwerken

3.1. Rahmenbedingungen der Umfragen

Es wurden zwei Umfragen mit Physik-Lehrkräften und -Referendar:innen im Rahmen von Fortbildungen in zwei aufeinanderfolgenden Jahren mittels Fragebogen durchgeführt.

Die erste Umfrage erfolgte im Frühjahr 2024 zum Angebot eines regionalen Lehrkräfte-Netzwerkes mittels teilstrukturiertem Fragebogen, woran 45 Proband:innen teilnahmen. Zum Einsatz kamen offene, halboffene sowie geschlossene Fragen, wobei letztere sich aus einer Mischung aus Single- (SC) und Multiple-Choice-Fragen (MC) zusammensetzen (s. Abschn. 3.2.1).

Im Frühjahr 2025 wurde eine zweite Umfrage zur allgemeinen Nutzung von Lehrkräfte-Netzwerken durchgeführt, ebenfalls mit Hilfe eines teilstrukturierten Fragebogens. An dieser nahmen 29 Lehrkräfte teil. Es wurden sowohl offene als auch geschlossene Fragen eingesetzt (s. Abschn. 3.2.2). Bei den geschlossenen Fragen handelte es sich entweder um dichotome oder ratingskalierte Fragen mit einer 4-stufigen Likert-Skala.

3.2. Erste Erkenntnisse aus den Umfragen

3.2.1. Umfrage 1: Angebot eines regionalen Treffens für MINT-Lehrkräfte

Vor dem Hintergrund des Aufbaus eines neuen regionalen Netzwerkes für MINT-Lehrkräfte wurde eine Umfrage zu dem Angebot eines solchen Formates durchgeführt.

Dazu wurden zunächst das generelle Interesse und die Vakanzen, daran teilzunehmen (geschlossene Frage, SC), abgefragt (s. Abb. 1). 58 % der befragten Lehrkräfte gaben an, dass sie gelegentlich (49 %) oder sogar regelmäßig (9 %) an einem Netzwerktreffen teilnehmen würden.

Haben Sie generell Interesse und Vakanzen an einem Lehrkräfte-Netzwerk (in der Nähe) teilzunehmen?

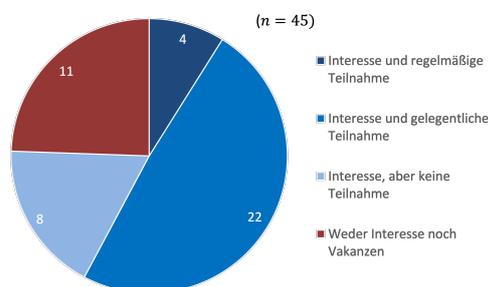


Abb. 1: Interesse und Vakanzen von Physik-Lehrkräften und -Referendar:innen an einem regionalen Netzwerk für MINT-Lehrkräfte teilzunehmen (Eigene Darstellung)

Als Gründe für die potentielle Teilnahme (offene Frage, induktive Kategorienbildung der Antworten) wurden der regelmäßige Austausch, die positiven Anregungen, insbesondere in Form von Material für den

eigenen Unterricht und das Networking an sich genannt. Die befragten Lehrkräfte sahen somit vor allem im Austausch und Ideentransfer, der Angebotserweiterung im Sinne der Unterrichtsentwicklung und dem sozialen Nutzen die Vorteile der Vernetzung (s. Abschn. 2.3).

Gleichzeitig wurde auf die begrenzten zeitlichen Kapazitäten auf Grund der hohen beruflichen Auslastung hingewiesen, die als Hauptgrund für eine Nichtteilnahme angeführt wurden (offene Frage, induktive Kategorienbildung der Antworten). 42 % der Befragten antworteten, dass sie nicht zu einem Netzwerktreffen kommen würden (s. Abb. 1).

Auf die Frage nach gewünschten Inhalten (halboffene Frage, MC) gab die Mehrheit der Lehrkräfte (78 %) an, dass sie sich Informationen zu Lehrinnovationen und Angeboten der Hochschule erhofften, z. B. zu Gamification oder neuen Experimenten (s. Abb. 2). Mehr als die Hälfte wünschten sich Workshops zu Experimenten (68 %), die Vorstellung und den Austausch von Unterrichtsmaterialien zum freien Gebrauch (65 %), generell einen freien Austausch sowie Diskussionen zwischen den Teilnehmenden (59 %) und Vorträge zur Umsetzung in Schule und der Lehrpraxis (57 %). Im Vergleich dazu fiel das Interesse an Vorträgen zu fachdidaktischer Forschung gering aus (16 %). Als weitere Vorschläge (Sonstiges) wurden Selbstbauexperimente und Experimente mit dem Arduino genannt (jeweils 3 %).



Abb. 2: Von Physik-Lehrkräften und -Referendar:innen gewünschte Inhalte für ein MINT-Lehrkräfte-Netzwerk (Eigene Darstellung)

Darüber hinaus wurden verschiedene organisatorische Rahmenbedingungen abgefragt, wie der Turnus (geschlossene Frage, SC). Eine Mehrheit von 82 % favorisierte ein Treffen pro Quartal. Weder monatliche Zusammenkünfte (0 %) noch jährliche (3 %) fanden großen Anklang. Die übrigen 15 % hielten einen regelmäßigen Austausch alle zwei Monate für sinnvoll.

3.2.2. Umfrage 2: Allgemeine Nutzung von Lehrkräfte-Netzwerken

Die zweite Umfrage befasste sich mit der Nutzung von Lehrkräfte-Netzwerken und dem Austausch mit anderen Lehrkräften im Allgemeinen sowie der Beschaffung von Informationen zu Lehrinnovationen.

Lediglich 14 % der Befragten gaben an, sich aktiv an Netzwerken für Lehrkräfte zu beteiligen (geschlossene Frage, dichotom; s. Abb. 3).

Sind Sie selbst aktiv in Lehrkräfte-Netzwerken?

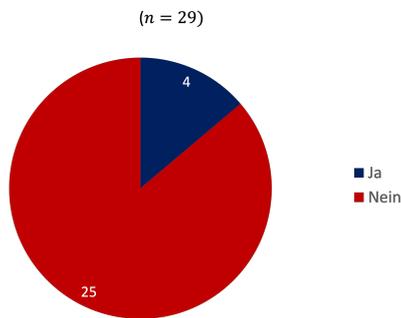


Abb. 3: Teilnahme von Physik-Lehrkräften und -Referendar:innen an Lehrkräfte-Netzwerken (Eigene Darstellung)

Als Gründe für die Teilnahme (offene Frage, induktive Kategorienbildung der Antworten) wurden der Austausch mit anderen und der Wunsch selbst aktiv zu werden (jeweils 50 %) angeführt (s. Abb. 4). Weitere Beweggründe waren Anregungen für den eigenen Unterricht zu bekommen, sich fortzubilden, neue Sichtweisen kennenzulernen, gemeinsame Haltungen zu entwickeln und das 4-Augen-Prinzip (jeweils 25 %). Auch in diesem Fall wurden der Austausch und Ideentransfer, die Angebotserweiterung zur Unterrichtsentwicklung und der soziale Nutzen gesehen. Darüber hinaus wurde die Kompetenzbündelung sowie die eigene Professionalisierung wertgeschätzt (s. Abschn. 2.3). Die Identifizierung mit dem Netzwerk (s. Abschn. 2.4) durch das Bilden gemeinsamer Haltungen ist ein Indiz für eine etablierte und funktionierende Struktur.

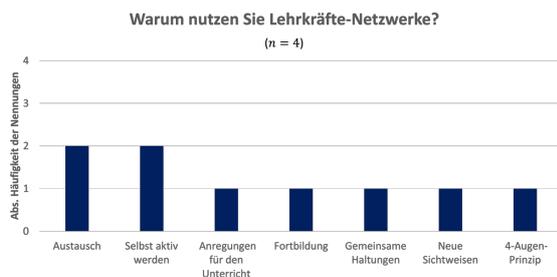


Abb. 4: Gründe von Physik-Lehrkräften und -Referendar:innen für die Beteiligung an Lehrkräfte-Netzwerken (Eigene Darstellung)

Als Begründung für die Nichtteilnahme an Netzwerkaktivitäten (offene Frage, induktive Kategorienbildung der Antworten) wurden die Unkenntnis über existierende Angebote (48 %), der zu hohe zeitliche Aufwand (28 %) und der zu geringe bzw. ungewisse Nutzen (12 %) genannt (s. Abb. 5). Darüber hinaus gaben 8 % an, dass sie ihren Fokus auf den kollegialen Austausch legen würden.

Alle befragten Lehrkräfte tauschten sich schulintern mit den Arbeitskollegen aus (geschlossene Frage mit

Warum nutzen Sie keine Lehrkräfte-Netzwerke?

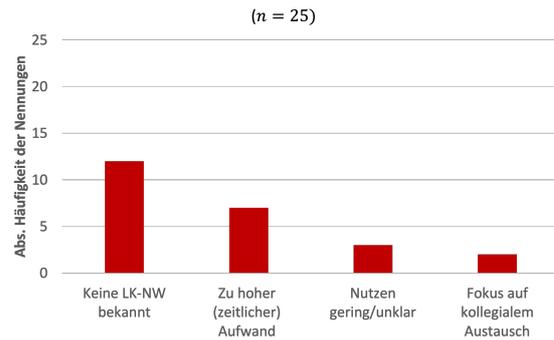


Abb. 5: Gründe von Physik-Lehrkräften und -Referendar:innen für die Nichtbeteiligung an Lehrkräfte-Netzwerken (Eigene Darstellung)

4-stufiger Likert-Skala). 65 % von ihnen taten dies regelmäßig, weitere 27 % unregelmäßig und 8 % nur manchmal. In 92 % der Fälle gab es auch einen schulübergreifenden Austausch (geschlossene Frage mit 4-stufiger Likert-Skala). Davon waren 15 % regelmäßig, 35 % unregelmäßig und 42 % manchmal. Die restlichen 8 % gaben an sich gar nicht schulübergreifend auszutauschen.

Unter welchen Bedingungen würden Sie Lehrkräfte-Netzwerke nutzen?

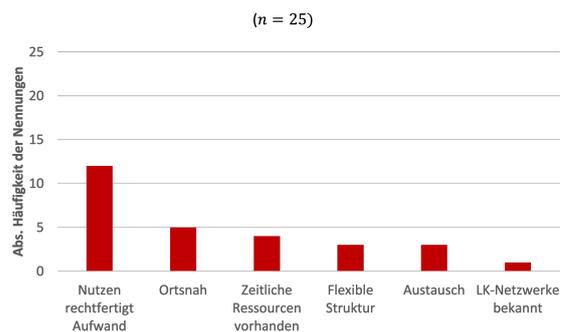


Abb. 6: Beweggründe von Physik-Lehrkräften und -Referendar:innen für die potentielle Beteiligung an Lehrkräfte-Netzwerken (Eigene Darstellung)

Auf die Frage, was die Lehrkräfte dazu veranlassen würde an Netzwerken teilzunehmen, die an sie gerichtet sind (offene Frage, induktive Kategorienbildung der Antworten; s. Abb. 6), wurde als mehrheitliche Bedingung genannt, dass der Nutzen den Aufwand rechtfertigen muss (48 %). Weitere Voraussetzungen waren die Ortsnähe (20 %), die vorhandenen zeitlichen Ressourcen der Lehrkräfte (16 %), die flexible Struktur des Netzwerkes (12 %), der produktive Austausch untereinander (12 %) und die Kenntnis von existierenden Lehrkräfte-Netzwerken (4 %). Auch in diesem Fall wurde der überwiegende Vorteil im Austausch und Ideentransfer gesehen (s. Abschn. 2.3). Dieser Gewinn würde aber nur ausreichend positiv wahrgenommen, wenn die Netzwerkeffekte den Aufwand der Beteiligung rechtfertigten. In

dieser Kohorte waren die Faktoren Zeit und Flexibilität (s Abschn. 2.4) ausschlaggebend, um sie von einer Teilnahme zu überzeugen.

Ferner wurde nach den Wegen der Informationsbeschaffung zu Lehrinnovationen gefragt (offene Frage, induktive Kategorienbildung der Antworten). Die Mehrheit der Befragten gab an, dass sie im Austausch mit anderen Lehrkräften, im eigenen Kollegium, aber auch auf Fortbildungen von Neuerungen erfahren würde. Weitere häufig genannte Optionen waren das Internet und Fachzeitschriften.

4. Fazit und Ausblick

In der ersten Umfrage zeigte sich, dass generell ein allgemeines Interesse an der Teilnahme an einem regionalen Netzwerkangebot von und für Lehrkräfte(n) bestünde (75 %). Die Proband:innen gaben an, dass sie auch prinzipiell Vakanzen hätten daran teilzunehmen (58 %). Die tatsächliche Teilnahmequote in solchen Netzwerken in der zweiten Umfrage fiel allerdings geringer aus. Von den befragten Lehrkräften nutzten nur wenige Lehrkräfte-Netzwerke (14 %). Als Hemmschwellen für die Teilnahme wurden die Unkenntnis über existierende Netzwerke, keine (zeitlichen) Vakanzen der Lehrkräfte und vor allem ein negatives Aufwand-Nutzen-Verhältnis genannt. Daraus lässt sich der Schluss ziehen, dass die mögliche Partizipation von Lehrkräften in Netzwerken bei vorhandenen zeitlichen Vakanzen der Lehrkräfte in erster Linie die Wahrnehmung eines positiven Aufwand-Nutzen-Verhältnisses erfordert und die begrenzten Kapazitäten der Lehrkräfte in ausreichendem Maße berücksichtigen muss.

In einem nächsten Schritt werden etablierte Netzwerke sowie deren Nutzung durch Lehrkräfte untersucht. Dabei interessiert insbesondere, inwiefern diese Lehrkräfte-Netzwerke einen praktischen Mehrwert für den eigenen Unterricht der Teilnehmenden bieten und dabei auch der Implementation physikdidaktischer Lehrinnovationen dienen (können).

5. Literatur

Aderhold, J. (2005). Unternehmen zwischen Netzwerk und Kooperation. In J. Aderhold, M. Meyer & R. Wetzels (Hrsg.), *Modernes Netzwerkmanagement. Anforderungen, Methoden, Anwendungsfelder* (S. 113–142). Betriebswirtschaftlicher Verlag.

Altrichter, H. (2010). Netzwerke und die Handlungskoordination im Schulsystem. In N. Berkemeyer, W. Bos & H. Kuper (Hrsg.), *Schulreform durch Vernetzung. Interdisziplinäre Betrachtungen* (S. 95–116). Waxmann.

Becker, T., Dammer, I., Howaldt, J., Killich, S. & Loose, A. (2007). Netzwerke – praktikabel und zukunfts fähig. In T. Becker, I. Dammer, J. Howaldt, S. Killich & A. Loose (Hrsg.), *Netzwerkmanagement. Mit Kooperation zum Unternehmenserfolg* (S. 3–11). Springer.

Berkemeyer, N., Manitus, V. & Müthing, K. (2008). Schulen im Team: erste empirische Befunde. In N. Berkemeyer, W. Bos, V. Manitus & K. Müthing (Hrsg.), *Unterrichtsentwicklung in Netzwerken. Konzeptionen, Befunde, Perspektiven* (S. 329–342). Waxmann.

Dederich, K. (2007). *Schulische Qualitätsentwicklung durch Netzwerke. Das Internationale Netzwerk Innovativer Schulsysteme (INIS) der Bertelsmann Stiftung als Beispiel*. VS Verlag.

Gräsel, C. & Parchmann, I. (2004). Implementationsforschung – oder: der steinige Weg, Unterricht zu verändern. *Unterrichtswissenschaft*, 32 (2004) 3, 196–214.

Haenisch, H. (2003). Wenn Schulen von anderen Schulen lernen. Gelingensbedingungen und Wirkungen schulischer Netzwerke. *Die Deutsche Schule*, 95 (3), 317–328.

Heinrich, M. (2009, 29. August). *Netzwerke und Bildungsregionen als Elemente der Unterstützung von Schulen* [Konferenzbeitrag]. Bildungskongress 2009: Bildungsqualität steigern, Übergänge erleichtern, Abschlüsse sichern, Hannover, Deutschland.

Haenisch, H. (2003). Wenn Schulen von anderen Schulen lernen. Gelingensbedingungen und Wirkungen schulischer Netzwerke. *Die Deutsche Schule*, 95 (2003) 3, S. 317–328.

Hiller, J. (2019). Symbiotische Implementationsstrategien am Beispiel von Unternehmensfallstudien. In N. Buchholtz, M. Barnat, E. Bosse, t. Heemsoth, K. Vorhölder & J. Wibowo. (Hrsg.), *Praxistransfer in der tertiären Bildungsforschung* (S. 223–232). Hamburg University Press.

Hußmann, S., Liegmann, A., Racherbäumer, K. & Walzebug, C. (2009). indivie – Individualisierung von Lehr-Lernprozessen im Netzwerk von Schule und Hochschule. In N. Berkemeyer, H. Kuper, V. Manitus & K. Müthing (Hrsg.), *Schulische Vernetzung. Eine Übersicht zu aktuellen Netzwerkprojekten* (S. 125–134). Waxmann.

Jungermann, A., Pfänder, H. & Berkemeyer, N. (2018). *Schulische Vernetzung in der Praxis. Wie Schulen Unterricht gemeinsam entwickeln können*. Waxmann.

Rauch, F., Kreis, I. & Zehetmeier, S. (2007). Unterstützung durch Begleitung und Vernetzung. Ergebnisse nach vier Jahren Betreuungsarbeit. In F. Rauch (Hrsg.), *Lernen durch fachbezogene Schulentwicklung. Schulen gestalten Schwerpunkte in den Naturwissenschaften, Mathematik und Informatik* (S. 253–268). StudienVerlag.

Sydow, J. & Windeler, A. (Hrsg.). (1994). *Management interorganisationaler Beziehungen. Vertrauen, Kontrolle und Informationstechnik*. Westdeutscher Verlag.

Teller, M. & Longmuß, J. (2007). *Netzwerkmoderation: Netzwerke zum Erfolg führen*. Ziel-Verlag.

- Wetzel, R., Aderhold, J., Baitsch, C., Keiser, S. (2001). Moderation in Netzwerken – Theoretische, didaktische und handlungsorientierte Betrachtungen aus einer internen Perspektive. In C. Baitsch & B. Müller (Hrsg.), *Moderation in regionalen Netzwerken*. Hampp.
- Weyer, J. (Hrsg.). (2000). *Soziale Netzwerke. Konzepte und Methoden der sozialwissenschaftlichen Netzwerkforschung*. Oldenbourg.
- Willke, H. (1998). *Systemtheorie. Band 3: Steuerungstheorie*. Lucius & Lucius.
- Wohlstetter, P., Malloy, C. L., Chau, D. & Polhemus, J. L. (2003). Improving Schools through Networks: A New Approach to Urban School Reform. *Educational Policy*, 17 (4), 399–430.

Einfluss von Eigenschaften der Innovation auf den Transfer in die Schulpraxis

Nils Haverkamp*, Alexander Pusch*, Stefan Heusler*

*Institut für Didaktik der Physik, Universität Münster
Nils.Haverkamp@uni-muenster.de

Kurzfassung

Während einige wenige Innovationen aus der didaktischen Forschung und Entwicklung, großflächig und regelmäßig in der Schulpraxis eingesetzt werden, gestaltet sich die Implementation vieler anderer Innovationen in der Schulpraxis schwerer.

In diesem Beitrag wird ein theoriebasierter Überblick darüber gegeben, wieso Implementation in unserem Bildungssystem häufig schwerfällt. Dazu werden sowohl allgemeine als auch schulspezifische Modellierungen von Implementation vorgestellt, diskutiert und auf Forschungsergebnisse aus der Schultransferforschung bezogen. Unter anderem wird dabei darauf eingegangen, welchen Einfluss die Wahrnehmung der Innovation auf den Transferprozess hat, welche Entscheidungsschritte Lehrkräfte bei der Implementation von Innovationen typischerweise durchlaufen und mit welchen Anforderungen sie sich konfrontiert sehen.

Auf Basis dieser theoretischen Modellierungen wird anschließend ein Vorschlag gemacht, wie vorgegangen werden kann, um Implementationsunterstützung für Lehrkräfte anzubieten. Zuletzt wird diese Strategie auf die Implementation der Low-Cost Experimente zur Wellenoptik, die im Rahmen des O3Q-Projektes entwickelt wurden, übertragen.

1. Einleitung: Die Low-Cost Experimente zur Wellenoptik aus dem O3Q-Projekt

Im Rahmen des Projektes Open3 Quantum (O3Q) wurde seit 2020 ein Low-Cost-Experimentierset zur Wellenoptik entwickelt (Haverkamp et al., 2023; Haverkamp et al., 2022). Mit diesem Experimentierset können u.a. verschiedene Interferometer aufgebaut werden und schultypische Experimente mit Gittern, Spalten und auch zum Thema Polarisierung durchgeführt werden. Das Experimentierset basiert auf einem 3D-gedruckten modularen System (ebd.). Die Dateien und ausführlichen Bauanleitungen stehen unter O3Q.de kostenlos zur Verfügung, sodass das Experimentierset günstig mit einem 3D-Drucker und gut zu verfügbaren Komponenten selbst nachgebaut werden kann.

Neben der Entwicklung des Experimentiersets ist ein weiteres Ziel des Projektes, dass die Experimente in Schulen eingesetzt werden können. Dazu wurde das Material bereits auf verschiedenen Fortbildungen und Tagungen vorgestellt. Das Experimentierset wird aktuell auch bereits von Lehrkräften im Unterricht eingesetzt.

Um Lehrkräfte bei der Implementation der Experimente im Unterricht bestmöglich zu unterstützen, soll der prinzipielle Implementationsprozess genauer untersucht werden. Dazu wird nachfolgend beschrieben, wie sich die Implementation in der Schule theoriebasiert modellieren lässt.

2. Was macht den Implementationsprozess in der Schule so besonders?

Implementationsforschung und verwandte Forschungszweige haben eine lange Tradition in unterschiedlichen Kontexten. Bereits in den 1960 Jahren fasst Rogers in seiner Theorie „Diffusion of Innovations“ viele Ergebnisse zu einer allgemeinen Beschreibung zusammen. Auch wenn diese Theorie nicht spezifisch für Implementationsprozesse in der Schule ist, bildet sie eine wichtige und allgemeine Grundlage für die Beforschung von Implementation.

Ein Teil dieser Beschreibung ist eine Modellierung davon, welcher Anteil der möglichen NutzerInnen die Innovation im Verlauf der Verbreitung auch wirklich nutzen. Dieser typische Verlauf ist auf Abbildung 1 dargestellt.

Die Modellierung von Rogers legt nahe, dass sich Innovationen dann erfolgreich verbreiten, wenn sie die „Take-Off“ Phase erreicht haben.

Demgegenüber stehen Ergebnisse der Schultransferforschung, die erfolgreiche Implementation im schulischen Kontext als äußerst schwierig und selten einordnen (z.B. Coburn & Talbert, 2006; Sumfleth, 2017; Schrader & Hasselhorn, 2020). Besonders eine nachhaltige Implementation über die Laufzeit einer direkten Betreuung beispielsweise im Rahmen eines Forschungsprojektes hinaus konnte im Schulkontext nur selten dokumentiert werden (Fishman et al., 2013). Ohne Zweifel ist eins der seltenen positiven Beispiele der letzten Jahre die Verbreitung der App Phyphox.

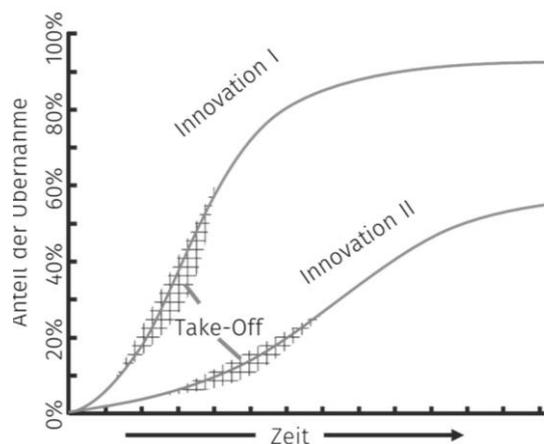


Abb. 1: Typische Übernahmerate von erfolgreichen Innovationen. Eigene Abbildung in Anlehnung an Rogers (2003, S. 170).

Dies scheint zunächst ein Widerspruch zur Modellierung der Verbreitung nach Rogers zu sein, diese lässt sich aber leicht auflösen, wenn man berücksichtigt, dass Rogers Modellierung sich nur auf erfolgreiche Innovationen bezieht und anfängliche, erste Nutzung von Innovationen noch keine erfolgreiche Verbreitung impliziert.

Um zu verstehen, wieso Implementation im Schulkontext häufig nicht erfolgreich ist, wird in den folgenden Kapiteln genauer darauf eingegangen, wie der Implementationsprozess für potenzielle NutzerInnen im Allgemeinen und spezifisch für Lehrkräfte aussieht. Damit soll auch die Frage beantwortet werden, wieso in der Schule scheinbar eine besonders enge und lange Betreuung erforderlich ist, um eine erfolgreiche Implementation zu ermöglichen. Außerdem sollen die vorgestellten Modellierungen als Grundlage dienen, um genauer zu beforschen, wie Lehrkräfte bestmöglich bei der Implementation der Low-Cost Experimente aus dem O3Q-Projekt unterstützt werden können.

3. Der individuelle Entscheidungsprozess nach Rogers

Ein weiterer Teil von Rogers (2003) Theoriekonstrukt aus den 60er Jahren ist eine Modellierung des

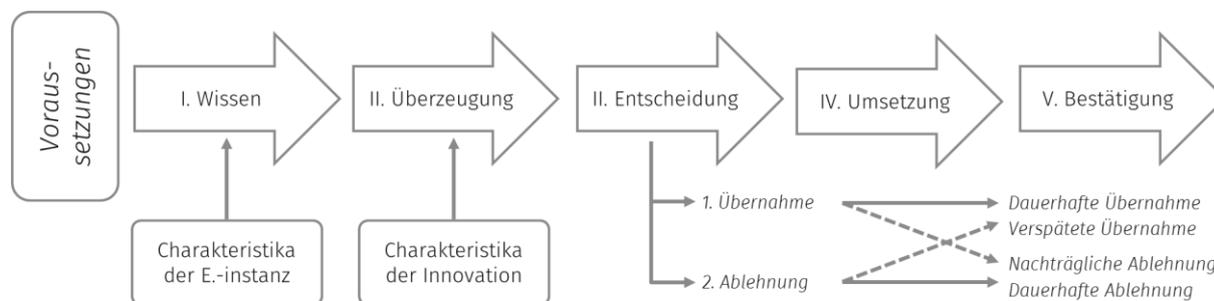


Abb. 2: Fünf Stadien im individuellen Innovations-Entscheidungsprozess (Eigene Darstellung in Anlehnung an Rogers (2003, S. 170))

individuellen Entscheidungsprozesses den potenzielle NutzerInnen vor der Übernahme oder Ablehnung einer Innovation durchlaufen. Wie auch die Modellierung aus Abbildung 1 hat diese Modellierung den Anspruch, möglichst allgemeingültig zu sein. Sie ist also nicht schulspezifisch.

Den Entscheidungsprozess unterteilt Rogers in fünf Stadien, die auf Abbildung 2 dargestellt sind und nachfolgend zusammengefasst werden (2003, S. 168–192):

3.1. Wissen

Im ersten Stadium „Wissen“ kommen potenzielle NutzerInnen zum ersten Mal mit der Innovation in Kontakt. Dies kann entweder aktiv aufgrund eigener Informationensuche oder passiv z.B. im Austausch mit Peers passieren. Wie wahrscheinlich eine Exposition mit der Innovation ist, hängt typischerweise von den Charakteristika der potenziellen NutzerInnen an. Diese schließen das Kommunikationsverhalten und die Art des sozialen Systems ein, in dem agiert wird.

3.2. Überzeugung

Im zweiten Schritt des Entscheidungsprozesses, der „Überzeugung“, bilden sich potenzielle NutzerInnen auf Basis des Wissens aus dem vorherigen Schritt eine Meinung zur Innovation. Für diese Meinung ist ausschlaggebend, wie potenzielle NutzerInnen die Innovation in Bezug auf bestimmte Eigenschaften wahrnehmen. Hier wurden von Rogers fünf Eigenschaften identifiziert, deren Wahrnehmung als besonders relevant gilt.

3.2.1. Relativer Vorteil

Der relative Vorteil beschreibt, wie sehr die Innovation eine Verbesserung gegenüber der aktuell genutzten Alternative darstellt. Damit ist der Vorteil sehr stark von den aktuellen Möglichkeiten des meinungsbildenden Individuums abhängig. Ein großer relativer Vorteil macht eine positive Meinung von der Innovation wahrscheinlicher.

3.2.2. Kompatibilität

Die Kompatibilität beschreibt, wie gut sich eine Innovation in den aktuellen Arbeitsablauf integrieren lässt, beziehungsweise, wie sehr der aktuelle

Arbeitsablauf für die Implementation der Innovation angepasst werden müsste. Sie ist sehr stark von den individuellen Rahmenbedingungen bzw. dem aktuellen Arbeitsablauf abhängig.

Wie auch der relative Vorteil macht eine hohe Kompatibilität eine positive Meinung zur Innovation wahrscheinlicher.

3.2.3. Komplexität

Die Komplexität ist ein Maß dafür, wie schwierig die Innovation (für potenzielle NutzerInnen) zu Verstehen und einzusetzen ist. Eine hohe Komplexität vergrößert u.a. das mit einer Übernahme verbundene Risiko und macht sie aus dem Grund unwahrscheinlicher.

3.2.4. Testbarkeit

Die Testbarkeit beschreibt, inwiefern eine Innovation vor der Implementation unverbindlich getestet werden kann, ohne viele Ressourcen zu investieren. Auch hier geht es darum, dass das Risiko für eine Fehlinvestition von Ressourcen minimiert werden kann. Im Gegensatz zur Komplexität steigert eine hohe Testbarkeit die Wahrscheinlichkeit einer positiven Meinung.

3.2.5. Beobachtbarkeit der Auswirkungen

Bei der Beobachtbarkeit der Auswirkungen geht es darum, wie einfach die positiven Effekte der Innovation von potenziellen Übernehmenden wahrgenommen und kommuniziert werden können. Positive Auswirkungen, die einfach zu beobachten sind, sorgen typischerweise auch dafür, dass schnell eine positive Meinung zu einer Innovation gebildet wird.

3.3. Entscheidung

Basierend auf der Meinung, die in der zweiten Phase gebildet wurde, wird eine Entscheidung zur Übernahme oder zur Ablehnung der Innovation getroffen. Falls dies möglich ist, wird die Innovation in der Regel außerdem in kleinem Rahmen auf ihre Wirksamkeit getestet. Wenn in dieser Testphase ein relativer Vorteil festgestellt wird, ist die Übernahme sehr wahrscheinlich.

3.4. Umsetzung

Die Umsetzungsphase, in der die eigentliche Implementation stattfindet, folgt typischerweise direkt nach einer positiven Entscheidung, wenn dies nicht durch logistische Gründe verhindert wird. Typisch für diese Phase ist, dass aktiv weitere Informationen gesucht werden, weil während des Einsatzes Fragen zur konkreten Umsetzung aufkommen. Im Verlauf der Umsetzungsphase verliert die Innovation ihre „fremde, neuartige“ Identität und wird Teil der internen Abläufe.

Im Verlauf der Umsetzung werden nicht nur die internen Prozesse reorganisiert, auch die Innovation wird an die internen Prozesse angepasst. Diese Anpassung, die Rogers „Re-Invention“ nennt, wird von

Innovatoren häufig als störend wahrgenommen, führt aber typischerweise zu einer schnelleren und nachhaltigeren Übernahme von Innovationen. Um dafür zu sorgen, dass der positive Effekt der Innovation nicht durch die „Re-Invention“ verringert wird, ist es wichtig, dass ändernde NutzerInnen die Funktionsprinzipien verstehen, die der Innovation zugrunde liegen.

3.5. Bestätigung

Am Ende des Implementationsprozesses steht die Bestätigung. Mit dieser Phase endet die aktive Suche nach Informationen zur Innovation. Wenn die ursprüngliche Entscheidung beibehalten wird, ist die Innovation jetzt entweder vollständig in die internen Prozesse integriert oder eine Übernahme wird nicht mehr in Betracht gezogen. Die ursprüngliche Entscheidung kann aber auch verworfen werden, wenn im Laufe des Einsatzes und der damit verbundenen Suche nach Informationen Schwierigkeiten auftauchen, die eine vollständige Integration weniger sinnvoll wirken lassen.

4. Was sind die speziellen Rahmenbedingungen in der Schule?

Das im vorherigen Kapitel vorgestellte Modell beschreibt Entscheidungsprozesse im Allgemeinen und verweist an vielen Stellen darauf, dass die Rahmenbedingungen ausschlaggebend für den Ablauf des Implementationsprozesses sind. Schulen haben aber ganz besondere Rahmenbedingungen, die sie deutlich von vergleichbaren Implementationsprozessen in bspw. wirtschaftlichen Settings unterscheiden. Auf diese besonderen Rahmenbedingungen wird in diesem Kapitel eingegangen.

4.1. Selbstreferenzielle und operativ geschlossene Systeme

Um zu erklären, wieso überhaupt Innovationen in der Schulpraxis implementiert werden, modellieren Gräsel et al. (2006, S. 450–455) Lehrkräfte bzw. Schulen als soziale Systeme, die im Allgemeinen aus Elementen, Strukturen und Prozessen bestehen. Sie zeichnen sich nach Luhmann (2002) unter anderem dadurch aus, dass sie selbstreferenziell und operative geschlossen sind. Das heißt, dass sich alle Elemente, Strukturen und Prozesse aus dem System wieder auf ebendiese Komponenten aus dem eigenen System beziehen. Dies führt zu einer zirkulären Vernetzung, die dazu dient, das „System Schule“ zu erhalten und zu reproduzieren.

Wenn diesem System Erweiterungen und Innovationen hinzugefügt werden sollen, muss zunächst sichergestellt werden, dass diese sich in das System integrieren lassen, und gegebenenfalls muss zunächst die Erweiterung bzw. Innovation angepasst werden. Anpassungen des Systems sind durch die Selbsterhaltende Struktur umständlich und unwahrscheinlich, aber bei einer ausreichenden Notwendigkeit auch nicht unmöglich.

Diese Eigenschaften, die Innovation im Schulkontext zu einem unwahrscheinlichen Prozess machen, sind aber keinesfalls als per se negativ anzusehen, sondern stellen sicher, dass das eigene System erhalten wird und sich somit vor Überforderung und Dysfunktionalität schützen kann. So ist bspw. leicht ersichtlich, dass ein Schulsystem oder eine Lehrkraft schon von der enormen Menge an neuen Informationen maßlos überfordert wäre, wenn auch nur ein kleiner Anteil, der auf Fortbildungen oder Fachzeitschriften vorgestellten Innovationen umgesetzt werden sollte.

4.2. Charakteristika von Lehrkräften

Gräsel (2010) fasst darüber hinaus einige wichtige Charakteristika von Lehrkräften und von Schulen, die einen Einfluss auf den Implementationsprozess haben, zusammen. Dabei nennt sie mehrere Faktoren, die die Motivation der Lehrkraft, eine neue Innovation einzusetzen, bedingen: (1) Die Überzeugung, dass durch die Innovation das Lernen der Schülerinnen und Schüler positiv beeinflusst wird, (2) das Vertrauen in die eigene Kompetenz den Ansprüchen der Umsetzung der Innovation gerecht zu werden und (3) außerdem eine ausreichende Autonomie, die von der Innovation gewährt wird. Hier zeigt sich ein starker Bezug zum relativen Vorteil (1), der Komplexität (2) und der Re-Invention (3) nach Rogers (siehe Abs. 3.2.1, 3.2.3 und 3.4).

Auffällig ist hier, dass seitens der Schule (in der Regel) kein wirtschaftliches Interesse im Vordergrund steht. Der relative Vorteil ergibt sich aus dem Vorteil für den Lernprozess der Schülerinnen und Schüler und ggf. auch durch eine Arbeitserleichterung für die Lehrkräfte.

4.3. Kopplung von Innovationen an Inhalte und das Curriculum

Eine weitere Besonderheit, die Schule von anderen Implementationskontexten unterscheidet, ist die notwendige Kopplung von Innovationen an den Unterrichtsablauf. Während Innovationen in anderen Systemen zum Teil täglich eingesetzt werden kann, sind viele Innovationen in der Schulpraxis an konkrete Unterrichtsinhalte gebunden. Das führt dazu, dass Lehrkräfte teilweise nur ein- bis zweimal im Schuljahr (oder seltener) die Gelegenheit haben, eine Innovation einzusetzen.

5. Das Concerns-Based Adoption Model

Basierend auf den Besonderheiten, die das System Schule ausmachen, wurde das „Concerns-Based Adoption Model“ (CBAM) von Hall (1974) entwickelt. In diesem Modell wird der Implementationsprozess für die Schule genauer beschrieben und ein Fokus daraufgelegt, mit welchen Problematiken sich Lehrkräfte in den einzelnen Phasen des Prozesses auseinandersetzen.

5.1. Levels of Use

Der Prozess ist im CBAM unterteilt in sieben „Levels of Use“, die die Lehrkräfte nacheinander durchlaufen. Sie können den Stufen im Entscheidungsprozess nach Rogers zugeordnet werden, spiegeln den Prozess aber gerade im Bereich der Umsetzung kleinschrittiger wider.

Die „Levels of Use“ und ihre Zuordnung zu Rogers sind in Tabelle 1 zu aufgelistet und werden nachfolgend jeweils kurz vorgestellt.

Tab. 1: Levels of Use im CBAM und Zuordnung zu den Schritten im Innovations-Entscheidungsprozess nach Rogers (2003).

Level of Use	Zuordnung zu Rogers
0. Nicht-Nutzung (Non Use)	-
I. Orientierung (Orientation)	Wissen & Überzeugung
II. Erste Einübung (Initial Training)	Umsetzung
III. Mechanische Nutzung (Mechanical)	Umsetzung
IV. Unabhängige Nutzung (Independent)	Umsetzung
V. Integrierte Nutzung (Integrated)	Umsetzung (& Bestätigung)
VI. Erneuerung (Renewing)	Umsetzung & Bestätigung

5.1.1. Nicht-Nutzung (Non Use)

Die nullte Stufe beschreibt die Zeit bevor die Lehrkraft mit der Innovation in Kontakt gekommen ist und höchstens weiß, dass Entwicklungen in dem Bereich stattfinden. Auf dieser Stufe finden typischerweise keine Innovationsbezogenen Handlungen bei Lehrkräften statt.

5.1.2. Orientierung (Orientation)

Die erste Stufe beschreibt die Phase der Informationsbeschaffung. Die Lehrkraft kommt hier in Kontakt mit der Innovation, setzt sich mit den Materialien, den Ansprüchen und den Alternativen auseinander und trifft eine Entscheidung über die Nutzung bzw. Nicht-Nutzung.

5.1.3. Erste Einübung (Initial Training)

Auf der zweiten Stufe setzt sich die Lehrkraft mit den logistischen Anforderungen der Innovation auseinander und übt den grundlegenden Umgang mit der Innovation ein, um eine erste Testung im Unterricht durchführen zu können.

5.1.4. Mechanische Nutzung (Mechanical)

Während der dritten Stufe nutzen die Lehrkräfte die Innovation im Rahmen einer Pilotierung. Aufgrund der neuen Anforderung zeichnet sich diese Phase dadurch aus, dass die Lehrkräfte Schritt für Schritt an einzelne Aspekte der Innovation nutzen. Die Lehrkraft hat aber keinen vollständigen Überblick, kann noch nicht weit vorausplanen und das Potential bestmöglich nutzen.

5.1.5. Unabhängige Nutzung (Independent)

Während der vierten Stufe sind Lehrkräfte in der Lage, die Innovation sicher und selbstständig so zu nutzen, dass die Innovation für die Lernenden einen Vorteil bringt. Ihnen fallen die positiven Effekte auf und sie experimentieren mit unterschiedlichen Variationen der Innovation, um den Lernerfolg für die Schülerinnen und Schüler zu maximieren.

5.1.6. Integrierte Nutzung (Integrated)

Die fünfte Stufe beschreibt eine integrierte Nutzung der Innovation, in deren Rahmen Lehrkräfte mit ihren Kollegen kooperieren und die Innovation beispielsweise jahrgangsstufen- oder fachübergreifend nutzen. Sie setzen die Innovation so ein, dass sie auch im Rahmen der Kooperation den bestmöglichen Lernerfolg verspricht.

5.1.7. Erneuerung (Renewing)

Während der sechsten und letzten Stufe evaluieren Lehrkräfte die Nutzung neu. Dazu setzen sie sich erneut mit möglichen Alternativen auseinander oder haben bereits Erfahrungen mit unterschiedlichen Alternativen gesammelt. Sie schätzen die Innovationen gegeneinander ab oder erforschen systematisch die Vor- und Nachteile unterschiedlicher Innovationen. Gegebenenfalls werden Innovationen miteinander kombiniert oder weiterentwickelt und so eine neue Innovation entwickelt.

5.2. Stages of Concern

Neben den „Levels of Use“ identifiziert Hall (1979) auch typische Bedenken (engl.: „Concerns“), die bei den Lehrkräften auftreten. Diese „Concerns“ sind hier allerdings nicht im Sinne von Sorgen zu verstehen, sondern im Sinne einer Entwicklungsaufgabe, mit der Lehrkräfte sich auseinandersetzen. Die sieben „Stages of Concern“ können den sieben „Levels of Use“ zugeordnet werden. Die Zuordnung impliziert jedoch nicht, dass die entsprechenden Bedenken automatisch auftreten, wenn die entsprechende Stufe erreicht ist. Stattdessen stellt Hall die Theorie auf, dass die Auseinandersetzung mit den „Concerns“, die etwa dem eigenen „Level of Use“ entsprechen Voraussetzung für einen erfolgreichen Implementationsprozess gesehen werden kann und eine zu starke Abweichung zwischen „Level of Use“ und „Stage of Concern“ Probleme hervorruft. Die einzelnen „Stages of Concern“ werden nachfolgend kurz vorgestellt.

5.2.1. Bewusstsein (Awareness)

Parallel zur nullten Stufe des „Level of Use“ sind bei der nullten Stufe keine Innovationsbezogenen Concerns vorhanden.

5.2.2. Informierend (Informational)

Auf der ersten Stufe betreffen die Concerns eine allgemeine Auseinandersetzung der Lehrkräfte mit der Innovation, ihren möglichen Effekten und ihren (u.a. materiellen) Anforderungen.

5.2.3. Persönlich (Personal)

Auf der zweiten Stufe beschäftigen sich die Lehrkräfte mit den Anforderungen der Innovation an die eigene Rolle. Sie wägt ab, inwiefern Sie den Anforderungen genügen kann und ob der Mehrwert den Aufwand rechtfertigt. Außerdem wird über die Kompatibilität mit den aktuellen Strukturen von Schule und Unterricht nachgedacht.

5.2.4. Management (Management)

Auf der dritten Stufe geht es bei den „Concerns“ darum, ob und wie die organisatorischen Herausforderungen der Innovation bewältigt werden können. Im Vordergrund steht dabei ein effektives Ressourcen- und Zeitmanagement.

5.2.5. Auswirkungen (Consequence)

Auf der vierten Stufe beschäftigen sich Lehrkräfte damit, welche Auswirkungen die Innovation tatsächlich auf die eignen Schülerinnen und Schüler hat. Auswertungen der Performanz der Lernenden dienen als Grundlage, um sich mit einer Optimierung des Einsatzes der Innovation zu beschäftigen.

5.2.6. Kollaboration (Collaboration)

Im Rahmen der fünften Stufe beschäftigen sich die Lehrkräfte damit, wie die Innovation sinnvoll im Rahmen einer Kollaboration genutzt werden kann. Dies kann bspw. auch einen Fächer- oder Jahrgangsstufen übergreifenden Einsatz umfassen.

5.2.7. Neuausrichtung (Refocusing)

In der letzten Stufe beschäftigen sich Lehrkräfte noch einmal grundlegend mit dem Einsatz der Innovation. Dabei überdenken Sie, ob sich die Idee der Innovation vielleicht verallgemeinern lässt, um auch positive Effekte für verwandte Bereiche zu bezwecken. Außerdem werden möglichen Alternativen überdacht, die die Innovation ergänzen oder ablösen könnten.

5.3. Implikationen des CBAM

In Halls Modell setzen sich Lehrkräfte immer wieder mit neuen „Concerns“ auseinander und die Stufen der Auseinandersetzung sind von unterschiedlichen Handlungsaspekten geprägt. Daran zeigt sich, dass hier ein starker Prozesscharakter betont wird, der sogar als Entwicklungsprozess der Lehrkräfte in Bezug auf die Innovation interpretiert werden kann. Dieser Entwicklungsprozess impliziert dadurch aber auch,

dass Lehrkräfte spezifische Unterstützung in Abhängigkeit ihres Fortschrittes im Projekt benötigen.

6. Welche Konsequenzen lassen sich für Implementation in der Schule ableiten?

In den vorherigen Abschnitten wurde dargestellt, wie eine Implementation neuer Innovationen in der Schule modelliert werden kann und wieso sie schwierig ist. In diesem Kapitel werden daraus Implikationen für die Unterstützung von Implementationsprozessen abgeleitet.

6.1. Fazits aus den vorgestellten Modellierungen

Die Modellierungen aus den vorherigen Abschnitten lassen sich zu drei Fazits zusammenfassen:

6.1.1. Fazit 1: Der Transfer ist zurecht schwierig und träge.

Dass Innovationen nur selten in Betracht gezogen werden, liegt in einem Schutzprinzip begründet, das Lehrkräfte und Schule vor Überforderung und struktureller Dysfunktion schützt und die schuleigene Identität erhält.

6.1.2. Fazit 2: Erfolgreiche Implementation in der Schule erfordert, dass Lehrkräfte einen zeitaufwendigen Prozess durchlaufen.

Der hohe Zeitaufwand resultiert daraus, dass Lehrkräfte Innovationen im Kontext verschiedener Bedenken („Concerns“) testen müssen. Dies ist aber häufig nur im entsprechenden Unterricht möglich und erfordert dann mehrere Schuljahre, um mehrere Stufen durchlaufen zu können.

6.1.3. Fazit 3: Lehrkräfte können in unterschiedlichen Abschnitten des Implementationsprozesses durch spezifische Hilfestellungen unterstützt werden.

Die Unterstützung muss dabei jeweils auf die entsprechenden Bedenken („Concerns“) zugeschnitten und zur richtigen Zeit verfügbar sein, um optimal zu unterstützen.

6.2. Wieso ist in der Schule eine besondere Betreuung von Innovationen notwendig?

Auf Basis der Fazits 2 und 3 lässt sich auch eine mögliche Antwort auf die Frage finden, wieso Implementation in der Schule besonders lange betreut werden muss: Implementation scheint häufig daran zu scheitern, dass die Betreuung wegfällt, wenn Lehrkräfte sich erst am Beginn oder in der Mitte des Implementationsprozesses befinden. Dies führt dazu, dass wichtige und notwendige Unterstützung in späteren Schritten des Prozesses wegfällt und der Prozess deshalb abgebrochen wird. In der Darstellungsweise von Abbildung 1 würde der typische Verbreitungsgrad einer nicht erfolgreichen Innovation wie in Abbildung 3 durch die rot gestrichelte Kurve dargestellt werden. Dabei würde sich der Hochpunkt der Kurve an dem Zeitpunkt befinden, an dem die Betreuung wegfallen würde.

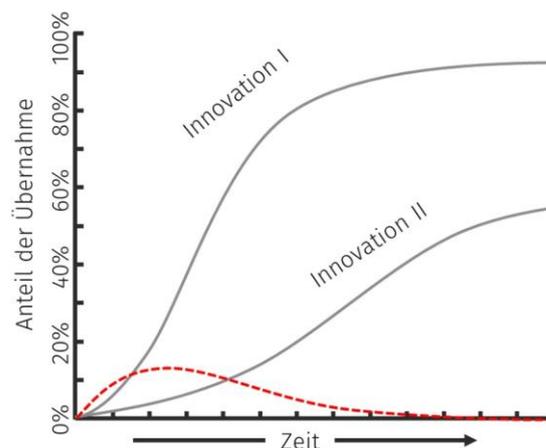


Abb. 3: Typische Übernahmerate von erfolgreichen Innovationen in Anlehnung an Rogers (2003, S. 170; eigene Darstellung) ergänzt um eine Modellierung einer nicht erfolgreichen Innovation (rot).

Das CBAM lässt vermuten, dass eine langfristige Betreuung, die auf die Bedürfnisse der Lehrkräfte eingeht, dabei unterstützen würde, dass Innovationen weiter übernommen und eingesetzt werden.

6.3. Bedeutung für weitere Forschung zur Implementation der Low-Cost Experimente

Diese theoretische Beschreibung soll als Grundlage für die Beforschung der Implementation der Low-Cost Experimente aus dem O3Q-Projekt dienen. Im Beitrag wurde dargestellt, dass adäquate Unterstützung für Lehrkräfte in unterschiedlichen Stadien des Implementationsprozesses notwendig ist.

Um dies ressourcenschonend zu ermöglichen, werden in Zukunft Interviews mit Lehrkräften geführt, die sich in unterschiedlichen Stadien des Implementationsprozesses befinden. In diesen Interviews sollen Unterstützungsbedarfe identifiziert werden, um darauf aufbauend entsprechende Hilfestellungen anzubieten. Im Idealfall können diese entwickelten Hilfestellungen dann unkompliziert online zur Verfügung gestellt werden. Auf diese Weise haben Lehrkräfte die Möglichkeit, sich flexibel damit auseinanderzusetzen und können auch über die Projektlaufzeit hinaus bei der Implementation unterstützt werden. Es bleibt jedoch herauszufinden, ob wirklich alle nötigen Hilfestellungen in einem Onlineformat adäquat zur Verfügung gestellt werden können.

7. Literaturverzeichnis

- Coburn, C. E. & Talbert, J. E. (2006). Conceptions of Evidence Use in School Districts: Mapping the Terrain. *American Journal of Education*, 112(4), 469–495.
<https://doi.org/10.1086/505056>
- Fishman, B. J., Penuel, W. R., Allen, A.-R., Cheng, B. H. & Sabelli, N. (2013). Design-Based Implementation Research: An Emerging Model for Transforming the Relationship of Research and Practice.

- Teachers College Record: The Voice of Scholarship in Education*, 115(14), 136–156.
<https://doi.org/10.1177/016146811311501415>
- Gräsel, C. (2010). Stichwort: Transfer und Transferforschung im Bildungsbereich. *Zeitschrift für Erziehungswissenschaft*, 13(1), 7–20.
<https://doi.org/10.1007/s11618-010-0109-8>
- Gräsel, C., Jäger, M. & Wilke, H. (2006). Konzeption einer übergreifenden Transferforschung und Einbeziehung des aktuellen Forschungsstandes: Expertise II zum Transferforschungsprogramm. In R. Nickolaus & C. Gräsel (Hrsg.), *Innovation und Transfer: Expertisen zur Transferforschung* (S. 445–566). Schneider-Verl.
- Hall, G. E. (1974). *The Concerns-Based Adoption Model: A Developmental Conceptualization of the Adoption Process Within Educational Institutions*. Communication Services Division, Research and Development Center for Teacher Education, Education Annex 3.205, University of Texas at Austin 78712.
- Hall, G. E. (1979). The concerns-based approach to facilitating change. *Educational Horizons*(Vol. 57, No. 4), 202–208.
<https://www.jstor.org/stable/42924345>
- Haverkamp, N., Pusch, A., Gregor, M. & Heusler, S. (2023). Low-Cost Schülerexperimente zur Wellenoptik: Ein modulares 3D-gedrucktes Experimentierset. *Der mathematisch-naturwissenschaftliche Unterricht*(05), 413–420.
- Haverkamp, N., Pusch, A., Heusler, S. & Gregor, M. (2022). A simple modular kit for various wave optic experiments using 3D printed cubes for education. *Physics Education*, 57(2), Artikel 025019.
<https://doi.org/10.1088/1361-6552/ac4106>
- Luhmann, N. (2002). *Soziale Systeme: Grundriß einer allgemeinen Theorie* (1. Aufl., 10 [Nachdr.]. Suhrkamp-Taschenbuch Wissenschaft: Bd. 666. Suhrkamp.
- Rogers, E. M. (2003). *Diffusion of innovations* (Fifth edition, Free Press trade paperback edition). *Social science*. Free Press.
- Schrader, J. & Hasselhorn, M. (2020). Implementationsforschung im Bildungsbereich. *Zeitschrift für Erziehungswissenschaft*, 23(1), 1–8. <https://doi.org/10.1007/s11618-020-00929-x>
- Sumfleth, E. (2017). Diagnose – Intervention – Implementation im Spannungsfeld zwischen fachdidaktischer Forschung und unterrichtlicher Praxis. In C. Maurer (Hrsg.), *Implementation fachdidaktischer Innovation im Spiegel von Forschung und Praxis: Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik Jahrestagung in Zürich 2016* (S. 5–18). Universität Regensburg.

Danksagung

Die Entwicklung der Low-Cost Experimente wurde im Rahmen der Drittmittelprojekte „Open3 Quantum (O3Q)“ (Fkz: 13N15388) und „Quantenphysik verstehen und erleben - eine skalierbare, offene und preiswerte Experimentalumgebung für alle (QuantumMiniLabs)“ (Fkz: 13N16714) von Bund und Ländern aus Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unterstützt.

Kompetenzrahmen zur Gestaltung von Experimentierphasen

- Literatur-Review basierte Entwicklung eines Modells -

Teresa Tewardt*, Lisa Stinken-Rösner*

*Universitätsstraße 25, 33615, Bielefeld
ttewardt@physik.uni-bielefeld.de

Kurzfassung

Experimentieren im Physikunterricht kann das konzeptuelle Verständnis, die Aneignung naturwissenschaftlicher Methoden sowie die Entwicklung experimenteller Fähigkeiten auf Seiten der Lernenden fördern (Idris et al., 2022; Kreidler & Kreidler, 1974; Li et al., 2023). Hierfür müssen Experimentierphasen von der Lehrkraft geplant und gezielt in den Unterrichtskontext eingebettet werden. Dies erfordert spezifische Kompetenzen, welche bisher theoretisch jedoch erst wenig bis gar nicht ausdifferenziert wurden (von Aufschnaiter & Blömeke, 2010). Dabei sollte gerade das Wissen über jene Kompetenzen den Ausgangspunkt zur Gestaltung und Evaluation der Wirksamkeit von (fachdidaktischen) Lehrangeboten für angehende Physiklehrkräfte auf universitärer Ebene darstellen. Anhand eines KI-gestützten integrativen Literatur-Reviews (Tewardt & Stinken-Rösner, in Vorbereitung) wurde ein Erwartungsmodell mit operationalisierbaren (Teil-)Kompetenzen für die Gestaltung von Experimentierphasen im Physikunterricht formuliert. Dieses Erwartungsmodell wurde in Interviews von Expert:innen auf Vollständigkeit, sowie Passung überprüft und fehlende Inhalte ergänzt. Das Modell bildet eine Grundlage, um die Kompetenzentwicklung angehender Physiklehrkräfte im Studium zu beschreiben.

1. Kontext und Motivation

Experimente sind ein zentraler Bestandteil des Physikunterrichts, da sie sowohl das konzeptionelle Verständnis als auch die Fähigkeit zur Durchführung wissenschaftlicher Untersuchungen fördern (Stinken-Rösner, 2020; Tesch & Duit, 2004). Mit den vielfältigen Einsatzszenarien von Experimenten im Physikunterricht (Girwidz, 2020) geht eine große Bandbreite an Anforderungen an (angehende) Lehrkräfte einher. Lehrkräfte stehen beim schulischen Experimentieren vor der Herausforderung, wissenschaftliche Genauigkeit mit pädagogischen Erfordernissen in Einklang zu bringen. Dies erfordert nicht nur experimentelle Kompetenzen, sondern auch die Fähigkeit, Experimente didaktisch sinnvoll in den Unterricht zu integrieren (Kunter & Baumert, 2011). Dafür benötigen Lehrkräfte entsprechende Kompetenzen, um experimentelle Phasen zu strukturieren und durchzuführen. Allerdings fehlt bislang eine allgemein anerkannte Definition von Experimentierkompetenz bei Lehrkräften (von Aufschnaiter & Blömeke, 2010).

2. Theoretischer Hintergrund

Bitzenbauer und Meyn (2021) verorten Experimentierkompetenz im Rahmen der professionellen Kompetenz von Lehrkräften, wie sie von Baumert und Kunter (2006) beschrieben wurde. Ihr Modell unterteilt die experimentellen Kompetenzen in drei Bereiche: (i) Überzeugungen und Werte über Lehren und Lernen, (ii) professionelles Wissen und (iii) motivationale Orientierung. Die Überzeugungen und Werte beeinflussen, wie Lehrkräfte Experimente in den Un-

terricht integrieren. Die motivationale Orientierung bestimmt, in welchem Maße sie ihre experimentellen Fähigkeiten tatsächlich einsetzen. Das professionelle Wissen basiert auf Shulmans Konzept des pädagogischen Inhaltswissens (PCK; Shulman, 1986) und umfasst:

- a) Pädagogisches Wissen (PK): Wissen über Lehr- und Lernprozesse unabhängig vom Fach.
- b) Inhaltliches Wissen (CK): Fachspezifisches Wissen und Hintergrundinformationen.
- c) Pädagogisches Inhaltswissen (PCK): Wissen darüber, wie fachspezifische Inhalte vermittelt und typische Lernschwierigkeiten adressiert werden können.

Koehler und Mishra (2009) erweiterten Shulmans Ansatz, indem sie Technologisches Wissen (TK) ergänzten. Die Integration von TK in den PCK-Rahmen führte zu vier weiteren Wissensbereichen:

- d) Technologisches Wissen (TK): Wissen über technische Geräte und Vorgänge.
- e) Technologisches Inhaltswissen (TCK): Wissen über den Einsatz digitaler Werkzeuge in fachlichen Kontexten.
- f) Technologisch-pädagogisches Wissen (TPK): Wissen über die Nutzung digitaler Werkzeuge in der Unterrichtsgestaltung.
- g) Technologisch-pädagogisches Inhaltswissen (TPaCK): Wissen darüber, wie digitale Werkzeuge das fachspezifische Lernen und Lehren unterstützen können.

Auch Osborne (2014) hebt zentrale Kompetenzen hervor, die Lehrkräfte benötigen, um wissenschaftliche Experimentierpraktiken zu vermitteln und diese in einen Unterrichtskontext einzubetten. Basierend auf den Next Generation Science Standards (NGSS; National Research Council, 2013) beschreibt er drei wesentliche Kompetenzbereiche: prozedurales Wissen (Handlungswissen über den Ablauf einer Experimentierphase), epistemisches Wissen (die Fähigkeit, Daten zu sammeln, um Fragestellungen zu beantworten) und professionelles Wissen (im Sinne von PCK nach Shulman, 1986). Schreiber et al. (2009) schlagen zudem einen dreistufigen Prozess vor, um experimentelle Kompetenz zu operationalisieren: Planung, Durchführung und Auswertung. Während sich spätere Studien verstärkt auf die Experimentierkompetenz von Lernenden konzentrieren (z. B. Schreiber et al., 2009), bleiben die spezifischen Anforderungen an Lehrkräfte, insbesondere bei der Planung von Experimenten, oft unberücksichtigt.

Darüber hinaus hat die zunehmende Digitalisierung die experimentelle Praxis sowohl in der Forschung als auch in der Bildung grundlegend verändert. Dennoch wird die Integration digitaler Technologien in experimentelle Phasen in den meisten Studien und Modellen kaum thematisiert. Bestehende Rahmenwerke wie die von Bitzenbauer und Meyn (2021) oder Osborne (2014) konzentrieren sich auf das PCK-Modell nach Shulman (1986), während die Dimension des TPaCK nach Koehler und Mishra (2009) weitgehend unberücksichtigt bleibt.

3. Forschungsfrage

Das Entwerfen, Planen und Durchführen von Experimenten sind wesentliche Bestandteile des Physikunterrichts in der Schule, die für das Erreichen der Lehrplanziele und die Förderung des naturwissenschaftlichen Denkens wichtig sind. Um diesen umfassenden Prozess der Gestaltung von Experimentierphasen im Unterricht erfolgreich umsetzen zu können, benötigen Lehrkräfte spezifische Kompetenzen. Da in der Literatur kein Konsens darüber besteht, welche expliziten Kompetenzen für eine erfolgreiche Umsetzung von Experimentierphasen notwendig sind, ergibt sich folgende Forschungsfrage: Welche Kompetenzen benötigen (angehende) Physiklehrkräfte, um Experimentierphasen im Unterricht erfolgreich umzusetzen?

4. Forschungsmethode und -design

In dieser Studie wurde ein integratives Literatur-Review nach Torraco (2005) als Methode gewählt. Diese Methode ermöglicht einen systematischen Überblick über den aktuellen Forschungsstand (vgl. Abb. 1), von dem ausgehend Kompetenzerwartungen an (angehende) Lehrkräfte identifiziert werden können. In einem zweiten Schritt wird eine qualitative Inhaltsanalyse durchgeführt (Torraco, 2005). Ziel ist es, bestehende Modelle und Konzepte zu identifizieren, zu vergleichen, ein neues ganzheitliches

Rahmenkonzept abzuleiten und gleichzeitig Desiderate im Forschungsstand zu erkennen.

Die Suchanfrage umfasste die Schlüsselwörter: experiment*, Kompetenz*, Lehr* und Physik (Tewordt & Stinken-Rösner, accepted). Synonyme wurden ausgewählt und einbezogen, um ein breites Spektrum relevanter Publikationen zu erfassen. Die Suche wurde auf Englisch und Deutsch durchgeführt, um die internationale Forschungslage zu berücksichtigen. Folgende Datenbanken wurden durchsucht: Scopus, ERIC, FIS Bildung sowie die Bielefeld Academic Search Engine (BASE). Die Suchanfrage wurde am 20.06.2024 durchgeführt. Die Ergebnisse wurden in ein Literaturverwaltungsprogramm eingepflegt und für das Titel- und Abstract-Screening aufbereitet.

Das Abstract-Screening erfolgte mithilfe künstlicher Intelligenz (KI) über die Software ASReview (Van De Schoot et al., 2021). Der Einsatz von KI hat das Potenzial die Effizienz, Systematik und Reproduzierbarkeit des Screenings zu erhöhen, da KI in der Lage ist, die Datenanalyse unbefangen zu automatisieren und zu optimieren (Van De Schoot et al., 2021). Die Software ermöglicht durch die Reduktion des Zeitaufwands und die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse die Durchführung des Reviews durch eine Einzelperson. Die KI wurde zunächst mit einer Auswahl relevanter Literatur trainiert. Anschließend sortierte sie alle Publikationen nach vorhergesagter Relevanz und optimierte diese Reihenfolge fortlaufend während des Screenings. So konnte die Zahl der manuell zu prüfenden Publikationen reduziert werden. Der Zeitpunkt des Abbruchs des Screening-Prozesses wurde nach Van Haastrecht et al. (2021) festgelegt. Die Abbruchregel basiert auf folgender Formel (1):

$$R \approx N \cdot \left(\frac{r}{r+i} \right) \cdot 0,95 \quad (1)$$

Dabei bezeichnet R die Mindestanzahl identifizierter relevanter Artikel, die zur Beendigung des Screenings erforderlich ist, N die Gesamtstichprobengröße, r die Anzahl der in einer Teilstichprobe als relevant identifizierten Abstracts und i die Anzahl der irrelevanten Abstracts. Um ein Oversampling relevanter Abstracts zu vermeiden, wird die geschätzte Zahl R mit dem Faktor 0,95 multipliziert.

Für die qualitative Inhaltsanalyse wurde der inhaltsstrukturierende Ansatz nach Kuckartz (2018) verwendet. Die Hauptkategorien wurden sowohl induktiv als auch deduktiv aus der relevanten Literatur abgeleitet. Diese Mischform eignet sich besonders für die strukturierte Kategorisierung von Inhalten.

Im ersten Analyseschritt wurden relevante Textpassagen (operationalisierte Kompetenzerwartungen) mit der Software MAXQDA (MAXQDA, 2025) markiert. Im zweiten Schritt wurden thematische Hauptkategorien gebildet. Dabei wurden Kategorien aus der Literatur (Bitzenbauer & Meyn, 2021; Koehler & Mishra, 2009; Schreiber et al., 2009) teilweise übernommen und inhaltlich erweitert. Im dritten Schritt wurden die kodierten Textstellen den vordefi-

nierten Hauptkategorien zugeordnet, bevor induktiv Unterkategorien gebildet wurden. Hinsichtlich des professionellen Wissens erfolgte die Unterkategorisierung deduktiv durch die Erweiterung des PCK-Modells zu TPäCK. In einem vierten Schritt wurde das Material erneut unter Anwendung des Kategoriensystems analysiert. Das finale Kategoriensystem wurde anschließend visualisiert (vgl. **Abb. 2**).

Zur Validierung des Modells wurden zwei Expert:innen konsultiert, die in der zweiten Phase der Lehramtsausbildung (Referendariat) als Fachseminarleitungen für die Ausbildung angehender Lehrkräfte verantwortlich und gleichzeitig selbst aktive Physiklehrkräfte sind. Beide verfügen über langjährige Praxiserfahrung als Mentor:innen, Prüfer:innen und Anleiter:innen im Fach Physik. Ihre Rückmeldungen wurden zur Validierung und Erweiterung des Kategoriensystems genutzt. Im Rahmen von Einzelinterviews wurden die Expert:innen gebeten, die vorab knapp erläuterten Hauptkategorien aus Sicht der Unterrichtspraxis ausdifferenzieren. Im Anschluss wurden die Kategorien sukzessive geöffnet und die Unterkategorien zur Diskussion gestellt. In diesem Kontext wurden sämtliche Punkte aus dem integrativen Literatur-Review reflektiert und auf ihre Eignung und die jeweilige Platzierung im Modell geprüft.

5. Ergebnisse

Die Ergebnisse des integrativen Literatur-Reviews sowie eine Übersicht über die Anzahl der in den einzelnen Screening-Schritten ausgeschlossenen Artikel und die jeweiligen Ausschlussgründe sind in **Abb. 1** dargestellt.

Mit der Suchanfrage wurden 4511 Publikationen identifiziert. Nach dem Entfernen von 361 Duplikaten sowie drei zurückgezogenen Artikeln verblieben 4147 Artikel in der Stichprobe. Das KI-gestützte Titel- und Abstract-Screening wurde nach knapp einem Drittel der Stichprobe mit $N_{\text{Screening}} = 176$ relevanten Beiträgen abgeschlossen (vgl. van Haastrecht et al. (2021) mit $N_{\text{Teil}} = 1355$, $r = 60$). Es wurden 3971 Beiträge als thematisch nicht relevant eingestuft.

Im Volltext-Screening wurden die verbleibenden Artikel hinsichtlich Verfügbarkeit, sprachlicher Eignung, thematischer Passung und Zielgruppenrelevanz geprüft (vgl. **Abb. 1**). In diesem Schritt wurden weitere 100 Beiträge ausgeschlossen.

Weitere 35 Beiträge wurden ausgeschlossen, da sie zwar allgemein Kompetenzen thematisierten, diese jedoch weder operationalisierten noch differenzierten. Somit waren sie für die Beantwortung der Forschungsfrage nicht geeignet. Darüber hinaus wurden zwölf weitere Artikel durch Rückwärts- und Vorwärtssuchen ergänzt oder nachträglich in die Stichprobe integriert, da sie zum Zeitpunkt der Suchanfrage noch nicht publiziert waren, jedoch im Nachhinein als relevant klassifiziert wurden. Die endgültige Stichprobe für die Synthese umfasst damit $N_{\text{final}} = 53$ Artikel. Die Expert:innen hatten keine Einwände gegen die ermittelten Kategorien. Es wurden jedoch Details und Blickpunkte ergänzt, die aus der Literatur des integrativen Reviews nicht hervorgegangen waren. Dies eröffnet eine wichtige neue Perspektive auf blinde Flecken der Forschung in der Didaktik.

Aus den Erkenntnissen des integrativen Literatur-Reviews konnten neben den Kompetenzen, die eine Lehrkraft für die Gestaltung von Experimentierpha-

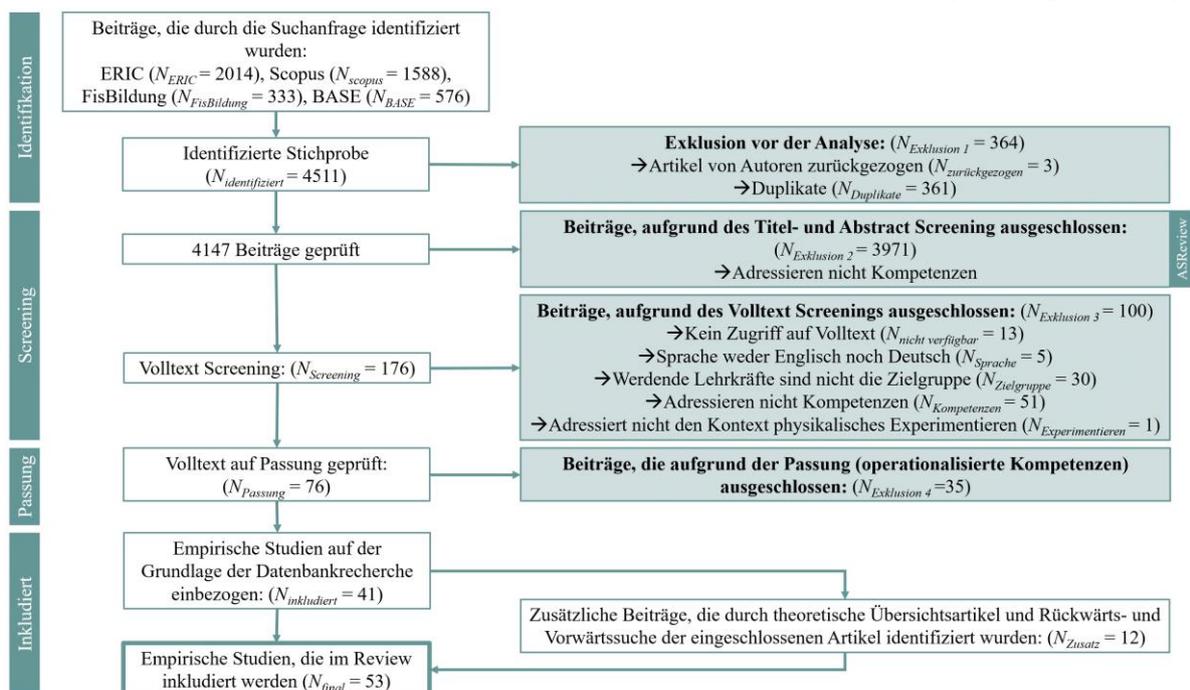


Abb. 1: Vorgehensweise beim integrativen Literatur-Review (Abbildung adaptiert nach Moher et al., 2009; Wörner et al., 2022)

sen benötigt (im professionellen Wissen zusammengefasst), zwei weitere relevante Faktoren identifiziert werden, die maßgeblichen Einfluss auf die Gestaltung von Experimentierphasen nehmen: Die Rahmenbedingungen des schulischen Umfelds (z. B. finanzielle und materielle Ressourcen, Teamarbeit) und die Persönlichkeit der Lehrkraft (z. B. Leidenschaft, Praxisnähe).

Das daraus entwickelte Modell für das Designen von Experimentierphasen (DEP-Modell) (Abb. 2) bietet eine praxisnahe Grundlage, um universitäre Lehrangebote so zu gestalten, dass sie angehende Lehrkräfte gezielt auf die Anforderungen beim Experimentieren im Unterricht vorbereiten. Subkategorien, die durch die Expert:innen im DEP-Modell ergänzt wurden, werden in der folgenden Aufzählung durch die Quellenangabe „Expert:innen“ gekennzeichnet.

Der erste Faktor „Rahmenbedingungen“ umfasst vier Subkategorien:

- 1) Verfügbarkeit und Eignung von Materialien (u. a. Juhásová & Kireš, 2024)
- 2) Zusammenarbeit und Informationsaustausch (u. a. Adlim et al., 2018; Barbenza & Miguel, 1972)
- 3) Professionalisierung und Lebenslanges Lernen (u. a.; Adlim et al., 2018; Cildir, 2024; Suliyanah et al., 2019)
- 4) Logistik und Verwaltung (Expert:innen)

Der zweite Faktor „Professionelles Wissen“ umfasst sieben Subkategorien:

- 1) PK mit sechs Sub-Subkategorien
 - a) Planung von Unterricht (u. a. Akuma & Callaghan, 2020; Durmaz, 2016; Girwidz et al., 2022; Pusch et al., 2024; Schröder et al., 2020; Suliyanah et al., 2019)
 - b) Kommunikationsfähigkeit (u. a. Aminoto et al., 2021; Cildir, 2024; Durmaz, 2016; Gkioka, 2019; Pusch et al., 2024; Suliyanah et al., 2019;)
 - c) Berücksichtigung individueller Voraussetzungen (u. a. Kurniawan & Indrawati, 2019; Pusch et al., 2024; Schröder et al., 2020; Suliyanah et al., 2019)
 - d) Lehr- Lerntheorien (u. a. Riese et al., 2022; Suliyanah et al., 2019;)

- e) Classroommanagement (u. a. Bitzenbauer & Meyn, 2021; Vogelsang et al., 2020)
 - f) Formatives und summatives Assessment (Expert:innen)
- 2) CK mit drei Sub-Subkategorien
 - a) Fachwissen (u. a. Bagno et al., 2006; Bitzenbauer & Meyn, 2021; Schödl & Göhring, 2015; Schröder et al., 2020; Vogelsang et al., 2020)
 - b) Wissenschaftliche Arbeitsweisen (u. a. Limatahu et al., 2018; Schreiber et al., 2009; Schreiber, 2012)
 - c) Nature of Science (u. a. Adlim et al., 2018; Akuma & Callaghan, 2020; Al-Salamat, 2023)
 - 3) TK ohne Sub-Subkategorien (Becker et al., 2020)
 - 4) PCK mit sechs Sub-Subkategorien
 - a) Adressat:innengerechte Erklärung (u. a.: Akuma & Callaghan, 2020; Cildir, 2024; Kulgemeyer, 2020; Pusch et al., 2024)
 - b) Elementarisierung und didaktische Reduktion (u. a.: Pusch et al., 2024; Riese et al., 2022)
 - c) Schüler:innenvorstellungen (u. a. Pusch et al., 2024; Riese et al., 2022)
 - d) Kontextualisierung von Inhalten (Suliyanah et al., 2019; Araújo & Dias, 2020; Kulgemeyer, 2020; Pusch et al., 2024; Schröder et al., 2020)
 - e) Funktion und Merkmale von Experimenten (u. a. Riese et al., 2022; Schreiber et al., 2009; Schröder et al., 2020)
 - f) Darstellung und Einsatz von Fragestellungen (Schröder et al., 2020)
 - 5) TCK mit zwei Sub-Subkategorien
 - a) Datenerfassung (u. a. Aminoto et al., 2021; Al-Salamat, 2023; Becker et al., 2020)
 - b) Datenverarbeitung (u. a. Aminoto et al., 2021; Al-Salamat, 2023; Becker et al., 2020)
 - 6) TPK mit zwei Sub-Subkategorien
 - a) Wissen über Gestaltungskriterien von Medien im Unterricht (u. a. Kulgemeyer, 2019; Pusch et al., 2024; Suliyanah et al., 2019;)



Abb. 2: DEP-Modell (Designen von Experimentierphasen im Unterricht)

- b) Wissen über digitale Medien für den Unterricht (u. a. Wolf & Kulgemeyer, 2016)
- 7) TPaCK mit zwei Sub-Subkategorien
 - a) Nutzung digitaler Unterrichtsmaterialien (u. a. Suliyannah et al. 2019, Akuma & Callaghan, 2020; Aminoto et al., 2021; Becker et al., 2020; Isaeva et al., 2024; Juhásová & Kireš, 2024)
 - b) Gestaltung digitaler Unterrichtsmaterialien (u. a. Becker et al., 2020)

Der dritte Faktor „Persönlichkeit“ hat fünf Subkategorien:

- 1) Soziale Kompetenzen (u. a. Al-Salamat, 2023; Cildir, 2024; Suliyannah et al., 2019)
- 2) Leidenschaft (u. a.: Akuma & Callaghan, 2020; Bitzenbauer & Meyn, 2021; Pusch et al., 2024; Vogelsang et al., 2020)
- 3) Engagement und Initiative (u. a. Adlim et al., 2018; Akuma & Callaghan, 2020; Barbenza & Miguel, 1972; Sujarittam et al., 2019)
- 4) Überzeugungen und Werte (u. a. Bitzenbauer & Meyn, 2021; Cildir, 2024; Corlu & Corlu, 2012; Kurniawan & Indrawati, 2019)
- 5) Reflektion und Exploration (u. a. Baxter & Lederman, 1999; DPG, 2014)

Die Kombination eines integrativen Literatur-Reviews, Expert:inneninterviews und bestehenden theoretischen Rahmenwerken im DEP-Modell ermöglicht einen differenzierten Überblick über die Einflussfaktoren und Kompetenzen, die für die Planung und Durchführung effektiver Experimentierphasen im Physikunterricht erforderlich sind. Die Ergebnisse verdeutlichen das Zusammenspiel von schulspezifischen Kontextfaktoren mit den Persönlichkeitsmerkmalen und dem professionellen Wissen der jeweiligen Lehrkraft.

Der primäre Wirkungsbereich in der universitären Ausbildung liegt in der Förderung der Dimension des professionellen Wissens angehender Physiklehrkräfte – insbesondere durch Seminare, Vorlesungen und Laborkurse. Das vorgelegte Modell gibt gezielte Anhaltspunkte dafür, welche Fähigkeiten systematisch aufgebaut werden können.

Zudem wird die Entwicklung eines geeigneten Instruments zur Erfassung dieser Kompetenzen derzeit vorangetrieben. Die Ergebnisse aus kommenden Erhebungen sollen künftig dabei helfen, das Modell weiter zu validieren und konkrete Empfehlungen für die Lehre abzuleiten.

Diese Forschung leistet damit einen Beitrag zur Weiterentwicklung des Bildungsbereichs, indem sie die Lücke zwischen theoretischen Modellen und praktischen Unterrichtsansforderungen schließt.

6. Diskussion und Grenzen

Die Ergebnisse dieser Studie verdeutlichen die Komplexität der Faktoren, welche die Gestaltung von Ex-

perimentierphasen im Physikunterricht beeinflussen. Das vorgeschlagene DEP-Modell differenziert zwischen drei Faktoren: Rahmenbedingungen, Professionellem Wissen und Persönlichkeit und liefert damit eine umfassende Struktur, die die spezifischen Anforderungen des Experimentierens im schulischen Kontext berücksichtigt. Besonders hervorzuheben ist die Verzahnung dieser Dimensionen: Professionelles Wissen ist nicht losgelöst von äußeren Rahmenbedingungen und persönlichen Eigenschaften der Lehrkräfte zu betrachten. Das unterstreicht die Forderung nach einer ganzheitlichen Lehrkräfteausbildung, die sowohl fachdidaktische als auch persönliche Kompetenzen adressiert und zugleich institutionelle Bedingungen reflektiert.

Es soll an dieser Stelle betont werden, dass das vorliegende Modell nicht statisch sein kann. Lehrpläne, technische Entwicklungen und gesellschaftliche Anforderungen verändern sich kontinuierlich, weshalb auch das Kompetenzverständnis fortlaufend angepasst werden muss. Das DEP-Modell bietet hier eine belastbare Grundlage, deren Anwendbarkeit und Relevanz jedoch regelmäßig überprüft werden sollte, insbesondere da es Publikationen nach dem Zeitpunkt der Suchanfrage nicht berücksichtigt.

Ein weitere Limitation ist die inhärente Subjektivität der Literaturlauswahl und -bewertung, trotz der transparenten Darstellung des Review-Prozesses und der Beteiligung von Interrater:innen bei der Entwicklung der Suchanfrage und Expert:innen im iterativen Modellbildungsprozess. Besonders die Entwicklung der Suchanfrage stellt eine Einschränkung dar, da sie naturgemäß bestimmte Fokussierungen vorgibt (Terwordt & Stinken-Rösner, in Vorbereitung).

Ein technischer Aspekt betrifft den Einsatz von KI beim Titel- und Abstract-Screening. Die Präzision der Ergebnisse hängt stark von den eingegebenen Parametern und Trainingsdaten ab. Es besteht daher das Risiko von Verzerrungen oder blinden Flecken im Screening-Prozess.

Obwohl das Modell in einer Interviewstudie mit zwei Expert:innen diskutiert und ergänzt wurde, kann die Allgemeingültigkeit des DEP-Modells nicht ohne Weiteres vorausgesetzt werden. Weitere Validierungsstudien in unterschiedlichen Kontexten sind notwendig, um die Übertragbarkeit und Praxistauglichkeit zu überprüfen.

7. Fazit & Ausblick

Das DEP-Modell bietet eine Grundlage für die Weiterentwicklung der Physiklehrkräftebildung. Es liefert konkrete Ansatzpunkte für die curriculare Gestaltung von Seminaren, Vorlesungen und Laborkursen. Besonders vielversprechend erscheint der Einsatz des Modells für die Entwicklung diagnostischer Instrumente, die die Professionalisierung angehender Lehrkräfte erfassen und fördern können.

Zukünftige Forschung sollte das Modell in realen Unterrichtskontexten evaluieren, um seine Praxistaug-

lichkeit zu überprüfen. Zudem wäre eine Übertragung auf andere MINT-Fächer denkbar, um fächerübergreifende Faktoren zu identifizieren. Ein weiterer Fokus könnte auf der Entwicklung von Lehrkräftefortbildungen zur digital gestützten Gestaltung von Experimentierphasen im Physikunterricht (z. B. Ziegler & Stinken-Rösner, 2024) liegen, die gezielt die im Modell verankerten Kompetenzen adressieren.

8. Literatur

- Adlim, M., Nuzulia, R., & Nurmaliah, C. (2018). The effect of conventional laboratory practical manuals on pre-service teachers' integrated science process skills. *Journal of Turkish Science Education*, 15(4), 116–129.
- Akuma, F. V., & Callaghan, R. (2020). Gaps in teacher competencies linked to inquiry-based practical work in certain resource-constrained South African physical sciences classrooms. *Journal of Physics: Conference Series*, 1512(1), 012035.
- Al-Salamat M. K. M. (2023) Correction: Scientific and engineering practices aligned with the NGSS in the performance of secondary stage physics teachers. *PLOS ONE* 18(10): e0292771. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0275158>
- Aminoto, T., Pujaningsih, F. B., Dani, R., & Riantoni, C. (2021). Assessing pre-service physics teachers' competencies in designing photoelectric effect experiment using PhET simulation. *Journal of Physics: Conference Series*, 1876(1), 012065.
- Araújo, R., & Dias, V. S. (2020). An analysis of the influence of the international masterclasses hands on particle physics on the self-efficacy beliefs of physics teachers. *Journal of Physics: Conference Series*, 1512(1), 012041. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1512/1/012041>
- Bagno, E., Levy, S., & Eylon, B.-S. (2006). How Can a Website for Physics Teachers Serve as a Tool for Professional Development? *Journal of Science Education and Technology*, 15, 215–219. <https://doi.org/10.1007/s10956-006-9000-z>
- Barbenza, G. H., & Miguel, O. (1972). A Teaching Strategy to Develop Physicist's Skills Early. *American Journal of Physics*, 40(2), 256–259. <https://doi.org/10.1119/1.1986504>
- Baumert, J., & Kunter, M. (2006). Stichwort: Professionelle Kompetenz von Lehrkräften. *Zeitschrift für Erziehungswissenschaft*, 9(4), 469–520. <https://doi.org/10.1007/s11618-006-0165-2>
- Baxter, J. A., & Lederman, N. G. (1999). Assessment and Measurement of Pedagogical Content Knowledge. In J. Gess-Newsome & N. G. Lederman (Hrsg.), *Examining Pedagogical Content Knowledge: Science & Technology Education Library*, vol 6. (S. 147–161). Springer. https://doi.org/10.1007/0-306-47217-1_6
- Becker, S., Bruckermann, T., Finger, A., Huwer, J., Kremser, E., Meier, M., Thoms, L.-J., Thyssen, C., & von Kotzebue, L. (2020). Orientierungsrahmen Digitale Kompetenzen für das Lehramt in den Naturwissenschaften – DiKoLAN. In S. Becker, J. Meßinger-Koppelt, & C. Thyssen (Hrsg.), *Digitale Basiskompetenzen – Orientierungshilfe und Praxisbeispiele für die universitäre Lehramtsausbildung in den Naturwissenschaften*, (S. 14–43). Joachim Herz Stiftung.
- Bitzenbauer, P., & Meyn, J. P. (2021). Fostering experimental competences of prospective physics teachers. *Physics Education*, 56(4), 045020. <https://doi.org/10.1088/1361-6552/abfd3f>
- Cildir, S. (2024). Improving the Professional Competencies of Physics Teacher Candidates Through Service Learning. In S. Valarmathi, J. Kareem, V. Tantia, K. Babu, & P. Lucas (Hrsg.), *Enhancing Curricula with Service Learning Models* (pp. 221–241). IGI Global Scientific Publishing. <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-5933-4.ch011>
- Corlu, M. A., & Corlu, M. S. (2012). Scientific Inquiry Based Professional Development Models in Teacher Education. *Educational Sciences: Theory and Practice*, 12(1), 514–521.
- Deutsche Physikalische Gesellschaft (Hrsg.). (2014). *Das Lehramtsstudium Physik in Deutschland*. https://www.dpg-physik.de/veroeffentlichungen/publikationen/studien-der-dpg/pix-studien/dpg-studie_das_lehramtsstudium_physik_in_deutschland.pdf
- Durmaz, H. (2016). The Effect of an Instructional Intervention on Enhancement Pre-Service Science Teachers' Science Processes Skills. *Asia-Pacific Forum on Science Learning and Teaching*, 17(2), 1–29.
- Girwidz, R. (2020). Experimente im Physikunterricht. In E. Kircher, R. Girwidz & H. Fischer (Hrsg.), *Physikdidaktik / Grundlagen*. (S. 263–291). Springer Spektrum. https://doi.org/10.1007/978-3-662-59490-2_7
- Girwidz, R., Theyßen, H., & Widenhorn, R. (2022). Experiments in physics teaching. In H. Fischer & R. Girwidz (Hrsg.), *Physics Education*.

- Challenges in Physics Education* (S. 269–296). Springer International Publishing.
- Gkioka, O. (2019). Preparing pre-service secondary physics teachers to teach in the physics laboratory: Results from a three-year research project. *AIP Conference Proceedings*, 2075(1), AIP Publishing. <https://doi.org/10.1063/1.5091406>
- Idris, N., Talib, O., & Razali, F. (2022). Strategies in mastering science process skills in science experiments: A systematic literature review. *Jurnal Pendidikan IPA Indonesia*, 11(1), 155–170. <https://doi.org/10.15294/jpii.v11i1.32969>
- Isaeva, R., Omaralieva, Z., Moldoiarova, Z., & Kyzy, G. B. (2024). Didactic training of future physics teachers to apply innovative technologies in educational process in the Kyrgyz Republic. *Scientific Herald of Uzhhorod University. Series Physics*, 55, 1569–1579. <https://doi.org/10.54919/physics/55.2024.156ys9>
- Juhászová, A., & Kireš, M. (2024). Developing the experimental skills of pre-service physics teachers. *Journal of Physics: Conference Series*, 2715(1), 012021. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2715/1/012021>
- Koehler, M., & Mishra, P. (2009). What is technological pedagogical content knowledge (TPACK)?. *Contemporary issues in technology and teacher education*, 9(1), 60–70.
- Kuckartz, U. (2018). *Qualitative Inhaltsanalyse. Methoden, Praxis, Computerunterstützung*, 4. Auflage, Beltz Juventa.
- Kulgemeyer, C. (2019). Qualitätskriterien zur Gestaltung naturwissenschaftlicher Erklärvideos. In C. Maurer (Hrsg.), *Naturwissenschaftliche Bildung als Grundlage für berufliche und gesellschaftliche Teilhabe* (S. 258–288). Universität Regensburg.
- Kulgemeyer, C. (2020). Erklären im Physikunterricht. In E. Kircher, R. Girwidz & H. Fischer (Hrsg.), *Physikdidaktik / Grundlagen*. (S. 403–426). Springer Spektrum. https://doi.org/10.1007/978-3-662-59490-2_11
- Kreitler, H., & Kreitler, S. (1974). The role of the experiment in science education. *Instructional Science*, 3, 75–88. <https://doi.org/10.1007/BF00117027>
- Kurniawan, D. A., & Indrawati, P. S. (2019). Science process skills and motivation. *Humanities and Social Sciences Reviews*, 7(5), 48–56. <https://doi.org/10.18510/hssr.2019.756>
- Li, C., Zhu, J., Wang, Y., & Zhang, D. (2023). Research on Simulated Apparatus for Physics Velocity Experiments. *Academic Journal of Engineering and Technology Science*, 6(9), 26–30. <https://doi.org/10.25236/ajets.2023.060905>
- Limatahu, I., Wasis, Sutoyo, S., & Prahani, B. K. (2018). Development of CCDSR Teaching Model to Improve Science Process Skills of Pre-Service Physics Teachers. *Journal of Baltic Science Education*, 17(5), 812–827.
- MAXQDA, 2025, Software für qualitative Datenanalyse, 1989 – 2025, VERBI Software. Consult. Sozialforschung GmbH, Berlin, Deutschland.
- Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., & Altman, D. G. (2009). Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement. *PLoS Medicine*, 6(7), e1000097. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097>
- National Research Council (2013) *Next Generation Science Standards: For States, By States*. The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/18290>
- Osborne, J. (2014). Teaching scientific practices: Meeting the challenge of change. *Journal of Science Teacher Education*, 25(2), 177–196.
- Kunter, M., & Baumert, J. (2011). Das COACTIV-Forschungsprogramm zur Untersuchung professioneller Kompetenz von Lehrkräften—Zusammenfassung und Diskussion. In M. Kunter, J. Baumert, W. Blum, U. Klusmann, S. Krauss, & M. Neubrand (Hrsg.), *Professionelle Kompetenz von Lehrkräften. Ergebnisse des Forschungsprogramms COACTIV* (S. 345–366). Waxmann. <https://doi.org/10.31244/9783830974338>
- Pusch, A., Ubben, M. S., Schlummer, P., & Welberg, J. (2024). *Demonstrationsexperimente gestalten: Konzeption und Umsetzung in Theorie und Praxis*. Springer Spektrum. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-68520-4>
- Riese, J., Vogelsang, C., Schröder, J., Borowski, A., Kulgemeyer, C., Reinhold, P., & Schecker, H. (2022). The development of lesson planning skills in the subject of physics: What influence does professional knowledge have? *Zeitschrift für Erziehungswissenschaft*, 25(4), 843–867. <https://doi.org/10.1007/s11618-022-01112-0>
- Schödl, A. M., & Göhring, A. (2015). Fachspezifische Lehrerkompetenzen (FALKO) - Teilprojekt Physik. *PhyDid B - Didaktik Der Physik - Beiträge Zur DPG-Frühjahrstagung*, DD 19.02. <https://ojs.dpg-physik.de/index.php/phydid-b/article/view/644>

- Schreiber, N., Theyßen, H., & Schecker, H. (2009). Experimentelle Kompetenz messen?!. *PhyDid A – Physik und Didaktik in Schule und Hochschule*, 3(8), 092–101.
- Schreiber, N. (2012). *Diagnostik experimenteller Kompetenz: Validierung technologiegestützter Testverfahren im Rahmen eines Kompetenzstrukturmodells* (Vol. 139). Logos Verlag.
- Schröder, J., Riese, J., Vogelsang, C., Borowski, A., Buschhüter, D., Enkrott, P., ... & Schecker, H. (2020). Die Messung der Fähigkeit zur Unterrichtsplanung im Fach Physik mit Hilfe eines standardisierten Performanztests. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 26(1), 103-122.
- Shulman, L.S. (1986). Those Who Understand: Knowledge Growth in Teaching. *Educ. Res.*, 15, 4–14.
- Stinken-Rösner, L. (2020). Simulations in science education—status quo. *Progress in Science Education*, 3(1), 26–34.
- Sujarittam, T., Yeung, A., & Tanamatayarat, J. (2019). Training science teachers in using guided inquiry-based learning to develop experimental design skills in laboratories. *Journal of Physics: Conference Series*, 1380(1), 012070. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1380/1/012070>
- Suliyannah, Admoko, S., Prahani, B. K., Yusrizal, Astutik, S., & Pangastuti, R. (2019). Analysis of physics teacher competence in post-SM-3T teacher education program. *Journal of Physics: Conference Series*, 1171, 012052. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1171/1/012052>
- Tesch, M., & Duit, R. (2004). Experimentieren im Physikunterricht—Ergebnisse einer Videostudie. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften: ZfDN*, 10, 51–69.
- Tewordt, T. & Stinken-Rösner, L. (accepted). Entwicklung eines Kompetenzrahmens experimenteller Fähigkeiten. In H. van Vorst (Hrsg.), *Lernen, lehren und forschen im Schülerlabor*.
- Tewordt, T. & Stinken-Rösner, L. (in Vorbereitung). A Literature-Review-Based Model of the Factors that Influence the Design of Experimental Phases in Physics Lessons.
- Torraco, R. J. (2005). Writing integrative literature reviews: Guidelines and examples. *Human Resource Development Review*, 4(3), 356–367.
- Van De Schoot, R., De Bruin, J., Schram, R., Zahedi, P., De Boer, J., Weijdem, F., ... & Oberski, D. L. (2021). An open source machine learning framework for efficient and transparent systematic reviews. *Nature Machine Intelligence*, 3(2), 125–133.
- Van Haastrecht, M., Sarhan, I., Yigit Ozkan, B., Brinkhuis, M., & Spruit, M. (2021). SYMBALS: A systematic review methodology blending active learning and snowballing. *Frontiers in Research Metrics and Analytics*, 6, 685591.
- Vogelsang, C., Borowski, A., Kugelmeyer, C., Riese, J., Buschhüter, D., Enkrott, P., Kempin, M., Reinhold, P., Schecker, H., & Schröder, J. (2020). Development of prospective physics teachers' professional knowledge and skills during a one-semester school internship. In O. Zlatkin-Troitschanskaia, H.A. Pant, M. Toepper & C. Lautenbach (Hrsg.). *Student Learning in German Higher Education: Innovative Measurement Approaches and Research Results* (S. 105–123). Springer VS. https://doi.org/10.1007/978-3-658-27886-1_6
- Von Aufschnaiter, C. & Blömeke, S. (2010). Professionelle Kompetenz von (angehenden) Lehrkräften erfassen—Desiderata. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 16, 361-367.
- Wolf, K. D., & Kulgemeyer, C. (2016). Lernen mit Videos? Erklärvideos im Physikunterricht. *Naturwissenschaften im Unterricht Physik*, 27(152), 36–41.
- Wörner, S., Kuhn, J., & Scheiter, K. (2022). The best of two worlds: A systematic review on combining real and virtual experiments in science education. *Review of Educational Research*, 92(6), 911–952.
- Ziegler, M., & Stinken-Rösner, L. (2024). Lernen mit (interaktiven) Experimentiervideos: Schülerlabore als Orte der Lehrkräftefortbildungen (LFB). *PhyDid B-Didaktik der Physik-Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung, DD 14.01*. <https://ojs.dpg-physik.de/index.php/phydid-b/article/view/1443>

MINT-Unterricht mit digitalen Medien adaptiv gestalten

Richard Schulte*, **Jasmin Moser⁺**, **Elisa Held[°]**, **Linda von Sobbe[°]**, **Ulrike Franke[^]**,
Anneke Schmidt[^], **Walther Paravicini***, **Jan-Philipp Burde⁻**, **Andreas Lachner[^]**

*AG Mathematik und ihre Didaktik, Eberhard-Karls-Universität Tübingen,

⁺Lehrstuhl für Gymnasialpädagogik sowie Lehr- und Lernforschung, Universität Zürich,

[°]Deutsches Institut für Erwachsenenbildung – Leibniz-Zentrum für Lebenslanges Lernen, Bonn,

[^]Tübingen Center for Digital Education, Eberhard-Karls-Universität Tübingen,

⁻AG Didaktik der Physik, Eberhard-Karls-Universität Tübingen

richard.schulte@uni-tuebingen.de

Kurzfassung

Der Umgang mit Heterogenität im Klassenzimmer stellt Lehrkräfte vor didaktische und pädagogische Herausforderungen. Adaptive Unterrichtsansätze gelten in diesem Zusammenhang als vielversprechende Möglichkeit im produktiven Umgang mit den unterschiedlichen (Lern-)Voraussetzungen der Schülerinnen und Schüler. Die Umsetzung adaptiven Unterrichts erfordert dabei besondere Kompetenzen von den Lehrkräften, die in entsprechenden Fortbildungen gefördert werden können. Zudem unterstützt die Entwicklung fachdidaktischer Unterrichtskonzepte und -materialien die Lehrkräfte bei der Umsetzung adaptiven Fachunterrichts. Der Beitrag zeigt anhand zweier Beispiele, wie die Umsetzung entsprechender Fortbildungsangebote und die Entwicklung adaptiver Unterrichtsmaterialien gelingen können. Dazu werden der Moodle-Selbstlernkurs „Adaptiver digital-gestützter Unterricht“ sowie adaptive Unterrichtsmaterialien für den Optik-Anfangsunterricht im Fach Physik vorgestellt. Der Selbstlernkurs und die Materialien sind im Verbundprojekt MINT-ProNeD als Teil des Kompetenzzentrums MINT im Kompetenzverbund lernen:digital entwickelt worden.

1. Einleitung

Schülerinnen und Schüler bringen ganz unterschiedliche (Lern-)Voraussetzungen in den Unterricht mit. Nicht nur leistungsbezogene Unterschiede, wie kognitive Fähigkeiten, fachliches Vorwissen, individuelle Interessen und motivationale Differenzen, sondern auch soziokulturelle Faktoren, wie beispielsweise das Geschlecht oder die Bildungsnähe des Elternhauses, tragen zur Heterogenität der Schülerinnen und Schüler bei und beeinflussen das Lernen im Unterricht (Bohl, 2023). Lehrkräfte stehen dadurch vor zahlreichen Herausforderungen (Budde, 2017; Trautmann & Wischer, 2011). In einer Untersuchung der Robert Bosch Stiftung (2024) gab rund ein Drittel der befragten Lehrkräfte an, die Heterogenität in den Klassen als eine der größten Herausforderungen wahrzunehmen. Zudem zeigt die Studie, dass rund „[d]ie Hälfte der Lehrkräfte [...] aktuell mit heterogenen Lernvoraussetzungen überfordert“ ist (Robert Bosch Stiftung, 2024, S. 30).

Für den Umgang mit der Heterogenität im Klassenzimmer bedarf es daher geeigneter Unterrichtsstrategien, die eine gezielte Förderung der Schülerinnen und Schüler durch bestmögliche Lerngelegenheiten ermöglichen und sich gleichzeitig als praxistauglich für die Lehrkräfte erweisen. Idealerweise sollten Lehrkräfte den individuellen (Lern-)Voraussetzungen gerecht werden, indem sie allen Schülerinnen und Schülern ein passgenaues Lernangebot bereitstellen, das auf die persönlichen Bedarfe zugeschnitten ist.

Solche individualisierten Unterrichtsansätze (Bohl, 2023) würden es zwar ermöglichen, der Heterogenität der Schülerinnen und Schüler optimal zu begegnen, jedoch ist die Zusammenstellung der individuellen Lernarrangements zeitaufwendig und im Unterrichtsalltag der meisten Lehrkräfte kaum realisierbar. Bei adaptiven Unterrichtsansätzen (Corno, 2008; Sibley et al., 2023) werden daher gezielt Gemeinsamkeiten und Unterschiede in den (Lern-)Voraussetzungen der Schülerinnen und Schüler diagnostiziert und entsprechend differenzierte Lernangebote bereitgestellt. Diese können von den Schülerinnen und Schülern anschließend auch gemeinsam in Lerngruppen mit je unterschiedlichem Lernstandniveau bearbeitet werden. Adaptiver Unterricht gilt daher als vielversprechender Ansatz im Umgang mit Heterogenität und als praxistauglicher im Vergleich zu individualisiertem Unterricht. Er kann sich zudem nachweislich positiv auf den Lernerfolg der – insbesondere leistungsschwächeren – Schülerinnen und Schüler auswirken (Sibley et al., 2024).

Die Planung und Umsetzung adaptiven Unterrichts erfordert vielfältige professionelle Kompetenzen seitens der Lehrkräfte, wie diagnostische Kompetenzen sowie fachspezifische Kompetenzen in Hinblick auf Differenzierungs- und individuelle Unterstützungsmöglichkeiten (u. a. Vock & Gronostaj, 2017). Dadurch besteht oftmals ein Bedarf zur gezielten Förderung dieser professionellen Kompetenzen, was unter anderem durch entsprechende Fortbildungen

gelingen kann (Vock & Gronostaj, 2017). Außerdem sind fachdidaktisch aufbereitete Unterrichtsmaterialien notwendig, die von Lehrkräften direkt im adaptiven Unterricht genutzt werden können und zugleich als Good-Practice-Beispiele für die Entwicklung eigener Unterrichtsmaterialien dienen.

Dieser Beitrag geht zunächst detailliert auf die Grundlagen des adaptiven Unterrichtens ein und beschreibt anschließend ein Projekt, in dem unter anderem Lehrkräftefortbildungen entwickelt und durchgeführt sowie Unterrichtsentwicklungs- und -beratungskonzepte in Form von Professionellen Lerngemeinschaften (Bonsen & Rolff, 2006) umgesetzt werden. Als Beispiele für die entstandenen Fortbildungsangebote werden ein fächerübergreifender Moodle-Selbstlernkurs für Lehrkräfte zum adaptiven Unterrichten sowie adaptive Unterrichtsmaterialien für den Optik-Anfangsunterricht im Fach Physik vorgestellt.

2. Adaptiver Unterricht

Adaptiver Unterricht ist durch die drei Phasen der „formativen Diagnose“, der „Makroadaption“ und der „Mikroadaption“ gekennzeichnet (Corno, 2008; Franke & Schulte, 2025; Sibley et al., 2023). Dabei werden die (Lern-)Voraussetzungen der Schülerinnen und Schüler im Rahmen der formativen Diagnose kontinuierlich erhoben. Hierbei steht nicht der Leistungsstand am Ende einer Lerneinheit im Fokus, wie bei einer summativen Diagnose (z. B. in Form einer Klausur), sondern das jeweils aktuelle Wissen der Schülerinnen und Schüler. Die Ergebnisse der formativen Diagnose helfen der Lehrkraft, ihre Einschätzungen zum Lernstand ihrer Schülerinnen und Schüler anhand objektiver Daten zu ergänzen oder zu korrigieren (Ohl & Mehren, 2016; Schrader, 2013). Die Informationen, die über die formative Diagnose zur Verfügung stehen, bilden auch die Basis für die daran anschließenden Adaptionen der Unterrichtsgestaltung.

Wie in Abbildung 1 dargestellt, kann dies auf der Ebene der Makroadaption und Mikroadaption stattfinden. Bei der Makroadaption erfolgt auf Basis der Ergebnisse der formativen Diagnose eine Einteilung

der Schülerinnen und Schüler in Lerngruppen, in denen Lernaufgaben auf unterschiedlichen Lernstandniveaus bearbeitet werden. Dabei kann die Bearbeitung der Aufgaben auch in Gruppenlernsettings erfolgen, wobei sich die Gruppen entweder homogen oder heterogen zusammensetzen. In homogenen Lerngruppen lernen Schülerinnen und Schüler mit etwa gleichem Lernstand oder ähnlichem Vorwissen zusammen, wohingegen in heterogenen Lerngruppen Schülerinnen und Schüler mit unterschiedlichem Vorwissen gemeinsam lernen. Sowohl bei homogenen als auch bei heterogenen Lerngruppen ist eine optimale Passung der bereitgestellten Lernaufgaben zu den (Lern-)Voraussetzungen der Schülerinnen und Schüler bedeutend für den Lernerfolg der Lerngruppe (Franke & Schulte, 2025; Sibley et al., 2023). Die Lernaufgaben sollten daher weder über- noch unterfordernd, sondern schrittweise an die nächsthöhere Lernstufe angepasst sein (Sibley et al., 2023; Vygotsky, 1978). Lehrkräfte haben auf der Ebene der Makroadaption verschiedene Möglichkeiten, das Lernen in den Lerngruppen adaptiv zu gestalten. Beispielsweise können sie die Art der Lernaufgaben derart anpassen, dass Schülerinnen und Schüler mit noch geringerem Vorwissen Lernaufgaben erhalten, anhand derer grundlegende Konzepte erneut erläutert und vertieft werden sollen. Schülerinnen und Schüler mit mehr Vorwissen profitieren eher von Lernaufgaben, die gezielt Problemlöseprozesse anregen oder kognitive Konflikte initiieren (Corno, 2008; Franke & Schulte, 2025). Auch mit einer an die Lerngruppen angepassten Art der Instruktion kann auf die unterschiedlichen Bedürfnisse der Lerngruppen eingegangen werden. Für Schülerinnen und Schüler mit geringerem Vorwissen eignet sich häufig ein stärker angeleiteter oder modellierter Input, für Schülerinnen und Schüler mit hohem Vorwissen hingegen eher ein offener, moderierender Instruktionsstil (Franke & Schulte, 2025; Kalyuga et al., 2003). Zudem kann die Lehrkraft flexibel die Zeit für die Bearbeitung der Lernaufgaben an die unterschiedlichen Bedarfe der Lerngruppe anpassen. Die Phase der Makroadaption schließt mit der Zusammenführung der Ergebnisse im

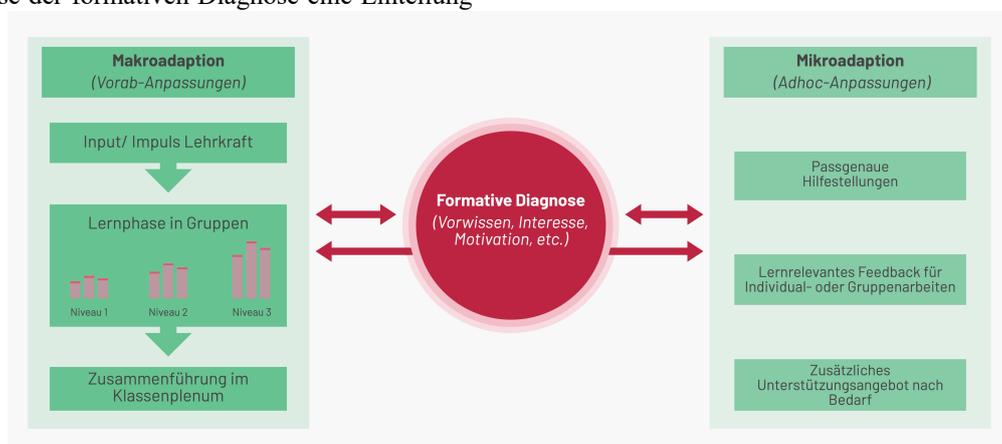


Abb. 1: Die drei Phasen des adaptiven Unterrichts in Anlehnung an Sibley et al. (2023) (Abbildung aus Franke & Schulte, 2025, unter CC BY-NC-SA 4.0-Lizenz)

Klassenplenum ab, bei der die Bearbeitungen der unterschiedlichen Aufgaben in den Lerngruppen vorgestellt und diskutiert werden. Die spezifischen Stärken der unterschiedlichen Lerngruppen werden somit in das gemeinsame Lernen integriert, sodass die Lernstände der Schülerinnen und Schüler nicht weiter divergieren und der Lernfortschritt der gesamten Klasse unterstützt wird (Sibley et al., 2023).

Bei der Mikroadaptation gibt die Lehrkraft gezielte Unterstützungsmaßnahmen auf Lerngruppenebene sowie auf individueller Ebene (Franke & Schulte, 2025). Ein zentraler Aspekt der Mikroadaptation ist das Feedbackgeben durch die Lehrkraft. Das Feedback der Lehrkraft sollte dabei eine möglichst lern- und motivationsförderliche Wirkung auf die Schülerinnen und Schüler haben. Das heißt, die Rückmeldung sollte über ein einfaches Lob hinausgehen und lernrelevante Informationen enthalten.

Kern einer effektiven adaptiven Unterrichtsgestaltung ist schließlich das Zusammenspiel der drei Phasen der formativen Diagnose, der Makroadaptation und der Mikroadaptation. In Abbildung 1 ist dieses Zusammenspiel durch die roten Pfeile symbolisiert: Die formative Diagnose steht im Zentrum der adaptiven Unterrichtsgestaltung. Die Ergebnisse der formativen Diagnose bilden einerseits die Grundlage für die Bildung der Lerngruppen und die Erstellung von Lernaufgaben und -materialien für diese Lerngruppen auf der Ebene der Makroadaptation (linker, kurzer Doppelpfeil) und andererseits sind sie Ausgangspunkt für gezielte, individuelle Hilfestellungen und Feedback auf der Ebene der Mikroadaptation (rechter, kurzer Doppelpfeil). Eine formative Diagnose kann auch auf der Makroadaptationsebene (z. B. durch Unterrichtsbeobachtungen) erfolgen, um anschließend Maßnahmen auf der Mikroadaptationsebene vorzunehmen – und umgekehrt (durchgängige rote Pfeil) (Sibley et al., 2023).

Digitale Medien können bei der Gestaltung und Durchführung von adaptivem Unterricht helfen. Umfrage-Tools für digitale Quizze können beispielsweise bei der Umsetzung der formativen Diagnose eine effektive Unterstützung bieten. Die formative Diagnose kann somit auch asynchron stattfinden, etwa als Hausaufgabe für die Schülerinnen und Schüler zur Vorbereitung auf die nächste Unterrichtsstunde. Digitale Lernplattformen können bei der Makroadaptation hilfreich sein, lernstanddifferenzierte Aufgaben oder spezifische Lernpfade für verschiedene Lerngruppen bereitzustellen. Interaktive Modellierungsvideos bieten zudem die Möglichkeit, Schülerinnen und Schüler in den Lerngruppen zu unterstützen. Individuelle Hilfestellungen während der Mikroadaptation können durch H5P-Elemente (<https://h5p.org>) integriert in Lernplattformen umgesetzt werden. Außerdem können KI-basierte digitale Tutoren den Lernprozess der Schülerinnen und Schüler unterstützen (Franke & Schulte, 2025; Sibley et al., 2023).

Die Umsetzung eines digital-gestützten adaptiven Unterrichts ist dabei keineswegs trivial. Das Verbundprojekt MINT-ProNeD verfolgt daher das Ziel, Lehrkräfte auf die kompetente adaptive Unterrichtsgestaltung unter Einsatz digitaler Medien vorzubereiten.

3. Das Verbundprojekt MINT-ProNeD

Das Verbundprojekt „MINT-ProNeD – Professionelle Netzwerke zur Förderung adaptiver, prozessbezogener, digital-gestützter Innovationen im MINT-Bereich“ (<https://mint-proned.de>) ist Teil des bundesweiten Kompetenzverbund lernen.digital/ und zielt auf die Entwicklung eines integrativen Gesamtkonzepts für die Lehrkräftefortbildung ab. Dazu werden an verschiedenen Standorten in Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz und Bayern forschungsbasierte Fortbildungs- und Beratungskonzepte entwickelt und innovative Cutting-Edge Technologien für den (zukünftigen) MINT-Unterricht erprobt. Integraler Bestandteil der Arbeit im Verbundprojekt ist der multidirektionale Dialog zwischen Wissenschaft und Praxis. So erfolgen die Entwicklung und Durchführung der wissenschaftsbasierten Fortbildungen in enger Zusammenarbeit mit erfahrenen Fortbildenden der Landesinstitute. In Professionellen Lerngemeinschaften (Bonsen & Rolff, 2006) entwickeln Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler außerdem zusammen mit MINT-Lehrkräften Unterrichtsmaterialien, die als Good-Practice-Beispiele im eigenen Unterricht eingesetzt werden können. Ein Beispiel hierfür aus dem Physikunterricht wird detailliert in Kapitel 5 beschrieben.

Um eine gemeinsame Basis für die fächerspezifischen Fortbildungen zu legen, die in den verschiedenen MINT-ProNeD Teilprojekten entstehen, wurde ein Online-Selbstlernkurs entwickelt, in dem sich Lehrkräfte mit den Grundlagen adaptiven Unterrichts vertraut machen können. Dieser wird im Folgenden vorgestellt.

4. Der Selbstlernkurs „Adaptiver digital-gestützter Unterricht“

Der standort- und fächerübergreifende Online-Selbstlernkurs „Adaptiver digital-gestützter Unterricht“ rahmt die in MINT-ProNeD entstandenen Fortbildungsangebote und führt adaptiven Unterricht mit seinen drei Phasen der formativen Diagnose, der Makroadaptation und der Mikroadaptation als vielversprechende Möglichkeit zum Umgang mit den Herausforderungen der Heterogenität im Klassenzimmer ein. Er ist als Vorschaltelement in den Fortbildungen sowie als „Stand-Alone-Kurs“ nutzbar. Damit die Nachhaltigkeit auch über den Projektkontext hinaus gewährleistet ist, ist der Selbstlernkurs als Moodle-basierte Open Educational Ressource (OER) weiterverwendbar und adaptierbar konzipiert. Somit ist er nicht nur als Endprodukt für Lehrkräfte rezipierbar, sondern hat auch Multiplikator:innen als Zielgruppe, die ihn für ihre Fortbildungen nutzen und an ihre

spezifischen Bedarfe anpassen können. Um als Vorschaltenelement für die Fortbildungen im Verbundprojekt MINT-ProNeD zu fungieren, ist der Selbstlernkurs in einem zeitlichen Rahmen von circa 45 Minuten bearbeitbar. Gleichzeitig ist er durch seine modulare Struktur flexibel von den Lehrkräften nutzbar, sodass sowohl ein schnelleres Bearbeiten als auch ein längeres Verweilen und Auseinandersetzen mit den Inhalten möglich sind. Die Module sind dabei als didaktischer Doppeldecker konzipiert: Basierend auf einer formativen Eingangsdiagnose, in der die Lehrkräfte zu ihren Interessen und ihren Vorkenntnissen befragt werden, werden Empfehlungen für inhaltliche Lernpfade, die als makroadaptives Element dienen, gegeben. Die Lernpfade enthalten Vertiefungstexte zu den drei Phasen adaptiven Unterrichtens – formative Diagnose, Makro- und Mikroadaptation. Eine Retrieval-Practice-Einheit bietet die Möglichkeit, die erlernten Inhalte zu festigen. Dabei erhalten die Lehrkräfte Feedback auf ihre Antworten, wodurch auch ein mikroadaptives Element im Selbstlernkurs umgesetzt ist. Um den Transfer in die Praxis zu fördern, werden zudem Unterrichtspläne aus verschiedenen MINT-Fächern zur Verfügung gestellt, die von den Lehrkräften als Word-Datei und damit bearbeitbar heruntergeladen werden können.

Drei professionell produzierte Videos rahmen die Module des Selbstlernkurses: Neben einem Einstiegsvideo, das der Relevanzinduktion unter anderem anhand eines Interviewausschnitts mit einer Mathematik-Lehrkraft dient, gibt das zweite Video einen Überblick über die drei zentralen Phasen adaptiven Unterrichtens, während das dritte Video vollständig aus Interviewsequenzen mit der Mathematik-Lehrkraft aus Video 1 besteht, die über ihre Erfahrungen mit und Umsetzungen von adaptivem digital-gestütztem Unterricht berichtet. Damit stellt sie eine durchgängige Bezugsperson für die teilnehmenden Lehrkräfte dar. Die Videos haben jeweils eine Länge von ca. drei bis vier Minuten.

Damit liegt der inhaltliche Schwerpunkt des Selbstlernkurses auf der Einführung des Modells adaptiven Unterrichtens (s. Abbildung 1) und wird dabei angereichert von Beispielen, wie eine (digital-gestützte) Umsetzung gelingen kann. So behält der Kurs seine Aktualität, da der Fokus nicht auf spezifischen digitalen Medien liegt, deren langfristige Verwendbarkeit nicht garantiert ist. In Bezug auf den Einsatz digitaler Medien im Unterricht wird vielmehr die Funktion digitaler Medien im Kontext von adaptivem Unterrichten betont, sodass Lehrkräfte befähigt werden, das Gelernte auf andere digitale Medien zu übertragen bzw. mithilfe von anderen digitalen Medien umzusetzen. Die Unterrichtspläne, gedrehten Videosequenzen und Beispiele in den Vertiefungstexten sind zwar MINT-spezifisch, jedoch sind die Inhalte weitgehend fachunabhängig und daher auch leicht auf andere Fächer übertragbar.

Im Folgenden werden die einzelnen Module des Selbstlernkurses und ihre inhaltliche Gestaltung vorgestellt.

4.1. Modul 1: Einstieg



Abb. 2: Szene aus dem Einstiegsvideo in Modul 1 (eigene Darstellung)

Das erste Modul des Selbstlernkurses wird durch ein Einstiegsvideo (s. Abbildung 2) eröffnet, das gezielt an die berufliche Lebenswelt der Lehrkräfte anknüpft. Unter dem Titel „Blick ins Klassenzimmer“ wird der (digital gestützte) Unterricht einer Mathematiklehrkraft an einer Reutlinger Gemeinschaftsschule gezeigt. Die Lehrkraft schildert zentrale Herausforderungen ihres Schulalltags und thematisiert dabei insbesondere den Umgang mit den heterogenen (Lern-)Voraussetzungen der Schülerinnen und Schüler. Im Zentrum steht die Frage, wie Unterricht so gestaltet werden kann, dass er den unterschiedlichen Bedarfen der Schülerinnen und Schüler gerecht wird. Zum Abschluss des Videos wird das Konzept des adaptiven Unterrichtens als Möglichkeit des konstruktiven Umgangs mit der Heterogenität der Schülerinnen und Schüler angedeutet und damit zum weiteren inhaltlichen Aufbau des Kurses übergeleitet.

Der problemorientierte Einstieg, der auf realen beruflichen Erfahrungen basiert, knüpft unmittelbar an die unterrichtspraktischen Erfahrungen der Lehrkräfte an und bietet dadurch ein hohes Identifikationspotenzial. Zugleich arbeitet er die Relevanz für die Auseinandersetzung mit dem Themenfeld Heterogenität und den Inhalten des Selbstlernkurses heraus. Um die Eingangsvoraussetzungen der teilnehmenden Lehrkräfte zu berücksichtigen, wird im Anschluss an das Eingangsvideo eine selbsteinschätzungs-basierte Eingangsdiagnose zum Vorwissen zu adaptivem Unterricht durchgeführt. Auf Grundlage der Angaben erhalten die Lehrkräfte Empfehlungen für weiterführende inhaltliche Lernpfade im nächsten Modul.

4.2. Modul 2: Inhaltlicher Überblick

Das zweite Modul widmet sich der inhaltlichen Wissensvermittlung: In einem Erklärvideo (s. Abbildung 3) werden die Kernaspekte des Modells zum adaptiven Unterricht nach Sibley et al. (2023) sowie deren Zusammenhänge herausgearbeitet. Die Verwendung animierter Visualisierungen dient dabei der Veranschaulichung und trägt dazu bei, dass sich die Lehrkräfte in dem circa 4-minütigen Video einen

fundierte Überblick über die theoretischen Grundlagen adaptiven Unterrichts verschaffen können.

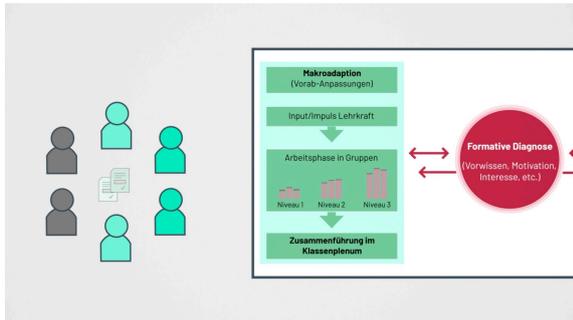


Abb. 3: Szene aus dem Erklärvideo in Modul 2 (eigene Darstellung)

Dabei werden die Relevanz der formativen Diagnose zur Feststellung der (Lern-)Voraussetzungen in der Klasse betont sowie Unterschiede zwischen formativer Diagnose, die der Lernbegleitung dient, und summativer Diagnose, die zur Leistungsbeurteilung verwendet wird, thematisiert. Im Video wird anschließend auf die Bedeutung der Diagnoseergebnisse für die makroadaptive Unterrichtsvorbereitung und die Einteilung der Schülerinnen und Schüler in lernstanddifferenzierte Gruppen eingegangen. Besonders wird hierbei die Zusammenführung der Ergebnisse aus den Lerngruppen im Klassenplenum betont, die am Ende der Gruppenphase stattfindet. Abschließend wird thematisiert, wie die Lehrkraft die Schülerinnen und Schüler durch Mikroadaptation, wie Lernhilfen und lernförderliches Feedback, während des Unterrichts zusätzlich unterstützen kann.



Abb. 4: Beispiel für einen Vertiefungstext als „Image Hotspot“ in H5P (eigene Darstellung)

Während das Video kompakt gehalten ist und die zentralen Aspekte betont, ohne dabei die Details und Beispiele genauer zu behandeln, haben die Lehrkräfte im Anschluss an das Video die Möglichkeit, einzelne Themen zu vertiefen. Dabei können sie sich an den inhaltlichen Empfehlungen aus der Eingangsdiagnose in Modul 1 orientieren oder sich von ihren Interessen nach dem Betrachten des Videos leiten lassen. Die Vertiefungstexte konkretisieren einzelne Aspekte aus dem Video, wobei beispielsweise darauf eingegangen wird, wie sich die Arbeit in homogenen und heterogenen Lerngruppen unterscheidet, wie Lehrkräfte durch die Öffnung der Aufgabenstellung den Schwierigkeitsgrad von Aufgaben variieren können und auf welche Aspekte sie beim Feedbackgeben achten sollten, um den Lernprozess der Schülerinnen und

Schüler zu fördern. Die Vertiefungstexte sind dabei als H5P-Element im Kurs angelegt und als sogenannte „Image Hotspots“ im Modell des adaptiven Unterrichts hinterlegt (s. Abbildung 4). Die grafische Ähnlichkeit zwischen dem Video und dem Vertiefungselement soll den Lehrkräften die Orientierung bei der Vertiefung der Inhalte erleichtern.

4.3. Modul 3: Umsetzung in der Unterrichtspraxis

Nachdem in Modul 2 durch den inhaltlich-theoretischen Fokus die Grundlage für die Umsetzung eines adaptiven Unterrichts gelegt wurde, zielt das dritte Modul darauf ab, die zentralen Aspekte aus dem Modell adaptiven Unterrichts praxisnah einzuordnen. Dabei geht es insbesondere darum, wie sich adaptive Maßnahmen im Unterrichtsaltag einer Lehrkraft in die Tat umsetzen lassen.

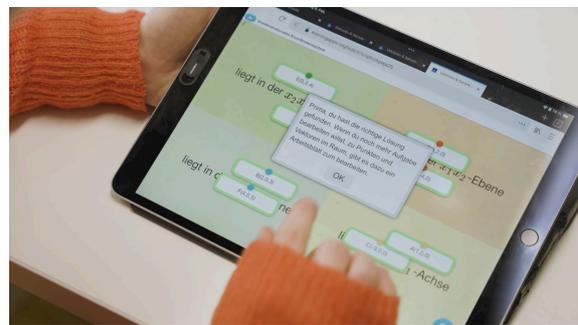


Abb. 5: Szene aus dem Video in Modul 3 (eigene Darstellung)

In einem dritten Video reflektiert die Lehrkraft, die im Einstiegsvideo bereits die Herausforderungen, die mit der Heterogenität der Schülerinnen und Schüler einhergehen, beschrieben hat, praktische Umsetzungsmöglichkeiten adaptiven Unterrichts anhand eines Beispiels aus dem Mathematikunterricht (s. Abbildung 5). Dabei geht sie auf die Vorteile ein, die adaptiver Unterricht im Vergleich zu ‚klassischem‘ Unterricht haben kann.

Den Abschluss des Moduls bildet eine Retrieval-Practice-Einheit, in der die Lehrkräfte die gelernten Inhalte anhand kurzer Aufgaben festigen können. Die Aufgaben liegen dabei meist in einem geschlossenen Format vor, das heißt, sie sind unter anderem durch Single- oder Multiple-Choice-Antworten lösbar oder als Zuordnungsaufgaben implementiert. Die Umsetzung als H5P-Elemente ermöglicht es zudem, den Lehrkräften direkt ein automatisiertes Feedback zu geben. Wie bei der Wahl der Vertiefungstexte entscheiden die Lehrkräfte auch in der Retrieval-Practice-Einheit selbstständig, welche Aufgaben sie bearbeiten möchten.

4.4. Weiterentwicklung und Zugang zum Kurs

Um die Lehrkräfte zusätzlich beim Transfer der im Kurs erlernten Inhalte in die eigene Unterrichtspraxis zu unterstützen, entsteht zurzeit ein viertes Kursmodul: Hier sollen spezifische Unterrichtsbeispiele und -materialien aus verschiedenen Unterrichtsfächern

bereitgestellt werden. Die Materialien sollen neben einem Verlaufsplan zur Unterrichtsstunde unter anderem auch Arbeitsblätter für die Gruppenarbeitsphase beinhalten und als Word-Dateien zum Download bereitstehen. Dies ermöglicht es nicht nur, die Beispiele im eigenen Unterricht zu erproben, sondern erlaubt auch Anpassungen an die eigene Lerngruppe. Derzeit beinhaltet das Modul die Materialien aus der Mathematikstunde, von der die Lehrkraft im dritten Video berichtet, sowie ein Beispiel aus dem Fach „Gesundheit mit Fokus Chemische Prozesse“ am beruflichen Gymnasium. Weitere Beispiele zur Umsetzung in anderen Unterrichtsfächern sollen während der verbleibenden Projektlaufzeit unter anderem durch die MINT-ProNeD Teilprojekte ergänzt werden.

Der Selbstlernkurs ist über die Moodle-Plattform des Zentrums für Schulqualität und Lehrerbildung Baden-Württemberg (ZSL) verfügbar (MINT-ProNeD, 2025b). Zudem wird eine Kopie des Kurses Ende September 2025 über das Zentrale Open Educational Resources Repositorium der Hochschulen in Baden-Württemberg (ZOERR; MINT-ProNeD, 2025a) zum Download angeboten. Dies ermöglicht es, den Kurs auf Moodle-Plattformen anderer Bildungseinrichtungen zu implementieren und bei Bedarf Anpassungen am Aufbau oder an den Inhalten vorzunehmen.

5. Die Professionelle Lerngemeinschaft „Adaptive Unterrichtsmaterialien für den Optikunterricht“

Im Rahmen einer Kooperation mit dem Zentrum für Schulqualität und Lehrerbildung Baden-Württemberg (ZSL) wurden über einen Zeitraum von mehreren Monaten ko-konstruktiv digitale Unterrichtsmaterialien mit H5P für den Optik-Anfangsunterricht entwickelt. Bei dieser professionellen Lerngemeinschaft (PLG; Bonsen & Rolff, 2006) fand ein kontinuierlicher, enger Austausch zwischen der Physikdidaktik der Universität Tübingen und einem Fortbildner für das Unterrichtsfach Physik statt, wodurch die Forschungs- und Praxisperspektive auf den Physikunterricht gewinnbringend kombiniert werden konnten. Zu Beginn stand ein Austausch über die Ziele für die anstehende Kooperation. So sollten aus der Zusammenarbeit konkrete, innovative Unterrichtsmaterialien hervorgehen, die Lehrkräfte bei der Umsetzung adaptiven Unterrichts unterstützen können. Die Materialien sollten außerdem öffentlich zugänglich und einfach weiterverwendbar sein. Durch die enge Zusammenarbeit mit dem Fortbildner des ZSL war es möglich, die entstandenen Materialien direkt im Unterricht zu pilotieren, um sie anschließend zu überarbeiten und zu optimieren. Durch dieses iterative Vorgehen entstanden erprobte, direkt im Unterricht einsetzbare, digitale Unterrichtsmaterialien, die am Ende der Kooperation auch weiteren Multiplikator:innen vorgestellt wurden.

Inhaltlich sind im Rahmen der PLG mehrere interaktive Versuchsanleitungen und niveaudifferenzierte, digitale Aufgaben zu den Themen Schatten,

Reflexionsgesetz und Spiegelbilder entstanden. Die Materialien enthalten insgesamt sechs H5P-Dateien zu einer Optikeinheit, die die oben genannten Themen beinhaltet. Tabelle 1 zeigt die entstandenen Materialien für die jeweiligen Unterrichtsstunden.

Stundenthema	Versuchs-anleitung (H5P)	Übungen (H5P)	Verzweigte Übungen (H5P)	Begleitendes AB (H5P)
Schatten mit 1 Lichtquelle	x		x	x
Schatten mit 2 Lichtquellen	x	x		x
Reflexion	x			x
Spiegelbilder			x	

Tab. 1: Übersicht über die entstandenen H5P-Module und begleitenden Materialien (eigene Darstellung)

Neben den H5P-Dateien wurden außerdem begleitende Arbeitsblätter und Umsetzungsvorschläge für eine mögliche Gestaltung des Unterrichts mit den H5P-Dateien erstellt. Die so entwickelten digitalen Lernmaterialien können vielseitig für die Gestaltung adaptiven Unterrichts genutzt werden, da sie sowohl Elemente der Makroadaption als auch der Mikro-adaption umsetzen. Für die Umsetzung der Makroadaption bieten sich die Materialien an, da sie teilweise niveaudifferenzierte Lernpfade mit Grundlagenaufgaben und Vertiefungsaufgaben enthalten. H5P erlaubt es, mit dem Aufgabentyp „verzweigte Aufgabe“, individuelle Lernpfade für die Lernenden zu erstellen. Somit können die Schülerinnen und Schüler im Anschluss an eine formative Diagnose durch die Lehrkraft, welche das Vorwissen der einzelnen Schülerinnen und Schüler zu den Themen der folgenden Übungen erfasst, in zwei niveaudifferenzierte Gruppen eingeteilt werden, wobei die Lernenden entweder die Grundlagenaufgaben oder die fortgeschrittenen Aufgaben bearbeiten. Eine weitere Möglichkeit für die Differenzierung zwischen verschiedenen Gruppen mit demselben H5P-Modul ist, die Lernenden selbstständig entscheiden zu lassen, ob sie die einfacheren oder schwereren Aufgaben bearbeiten. Hier findet die formative Diagnose über eine Selbsteinschätzung der Lernenden statt. Auch eine Kombination ist denkbar, wobei einige Schülerinnen und Schüler nach der Bearbeitung der Grundlagenaufgaben mit den Vertiefungen fortfahren und andere Lernende auf Grundlage des Feedbacks zu ihrer Bearbeitung der Grundlagenaufgaben diese anschließend noch einmal bearbeiten und dabei besonders auf zuvor aufgetretene Fehler achten. Bei diesem Einsatzszenario bilden die Übungsaufgaben selbst die Grundlage zur formativen Diagnose. Durch die Rückmeldung innerhalb der H5P-Übungen an die Schülerinnen und Schüler, wie viele Aufgaben sie korrekt lösen konnten und welche individuellen Schwierigkeiten aufgetreten sind, erhalten die Lernenden somit direkt ein Feedback zu ihrem Lernstand und entscheiden auf Grundlage dieser formativen Diagnose selbstständig über ihr weiteres Vorgehen. Die Übung zu „Licht und Schatten“ mit einer Lichtquelle weist

genau diese verzweigte Struktur auf. Abbildung 6 zeigt die Nutzeransicht bei der Bearbeitung einer Übung.

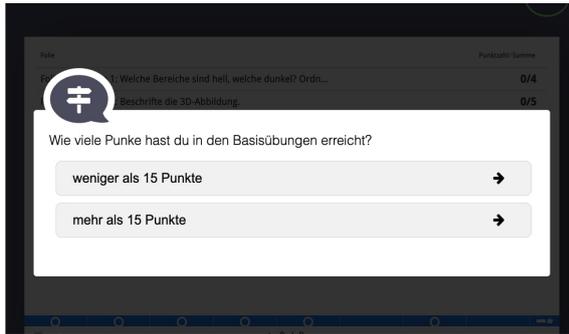


Abb. 6: Ausschnitt aus den Übungen zu „Licht und Schatten“ mit Auswahl der Verzweigungsoption (eigene Darstellung)

Neben Elementen der Makroadaptation finden sich auch Elemente der Mikroadaptation in den H5P-Materialien. Diese werden dadurch umgesetzt, dass die Lernenden durch die interaktiven digitalen Materialien fortlaufend Feedback zu den von ihnen bearbeiteten Aufgaben erhalten. Darüber hinaus beinhalten die H5P-Dateien Lernhilfen in Form von zunächst verdeckten Hinweisen, die durch die Lernenden genutzt werden können, wenn sie Schwierigkeiten bei der Bearbeitung der Aufgaben haben. Einen solchen Hinweis zeigt Abbildung 7.

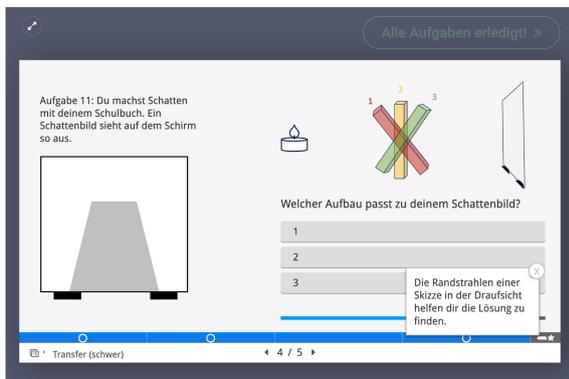


Abb. 7: Ausschnitt aus den Übungen zu „Licht und Schatten“ mit eingblendeter Hilfestellung (eigene Darstellung)

Das Feedback zu allen Übungsaufgaben sowie Aufgaben zu den interaktiven Versuchsanleitungen wurde bei der Erstellung der Materialien so formuliert, dass es über ein einfaches „Richtig“ bzw. „Falsch“ hinausgeht, damit die Lernenden für ihren Lernprozess hilfreiche Rückmeldungen erhalten (s. Abbildung 8). Bei der Formulierung des Feedbacks wurde vor allem auf die Berücksichtigung gängiger Schüler:innenvorstellungen eingegangen. Bei ausgewählten Aufgaben gibt das Feedback bei einer Falschantwort nicht direkt die Lösung vor, sondern enthält Hinweise zur Aufgabenbearbeitung, sodass die Lernenden die Aufgabe mithilfe der Hinweise wiederholen und versuchen können, diese richtig zu beantworten. Bei anderen Aufgaben wird ein

gängiges „Richtig“-„Falsch“-Feedback durch die Angabe eines möglichen Lösungsweises ergänzt.

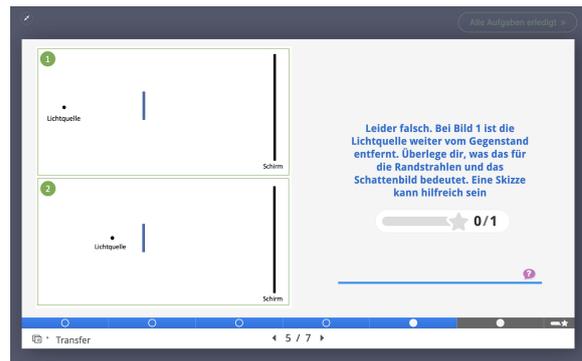


Abb. 8: Feedback im Rahmen einer Aufgabe zu „Licht und Schatten“ (eigene Darstellung)

Sowohl die Übungen als auch die interaktiven Versuchsanleitungen enthalten neben automatischem Feedback bei Bedarf aufrufbare Hilfestellungen als eine Form der Mikroadaptation. Hierdurch wird es den Schülerinnen und Schülern ermöglicht, die Versuche und Aufgaben trotz unterschiedlicher Vorkenntnisse bzw. unterschiedlichem Konzeptverständnis eigenständig zu bearbeiten.

Die im Rahmen der PLG entstandenen Materialien stehen als OER kostenfrei zur Verfügung (MINT-ProNeD, 2025a). Die H5P-Dateien können von den Lehrkräften auch in die schuleigene Moodle-Plattform eingebaut oder über LumiEducation (<https://lumi.education/de/>) wiederverwendet und bearbeitet werden. Dadurch hostet die Lehrkraft den H5P-Inhalt selbst, was ihr neben der Möglichkeit, die Inhalte an die eigenen Bedürfnisse anzupassen, auch erlaubt, Einsicht in die Bearbeitungsergebnisse einzelner Schülerinnen und Schüler zu erhalten.

6. Fazit

Die hier beschriebenen konkreten Beispiele aus dem Projekt MINT-ProNeD zeigen auf, wie zentrale Herausforderungen im Umgang mit Heterogenität im MINT-Unterricht adressiert werden können. Der modular aufgebaute Selbstlernkurs stellt beispielsweise nicht nur eine Einführung in die Prinzipien des adaptiven Unterrichts dar, sondern bietet durch interaktive Elemente, videobasierte Fallbeispiele und praxisorientierte Aufgabenformate ein hohes Maß an Unterrichtsnahe. Die im Rahmen einer PLG ko-konstruktiv erarbeiteten adaptiven Unterrichtsmaterialien für den Optik-Anfangsunterricht auf Basis von H5P-Modulen zeigen exemplarisch, wie differenzierte Lernpfade, interaktive Rückmeldungen und gezielte Hilfestellungen mit Hilfe von digitalen Medien realisiert werden können. Durch die Bereitstellung der Materialien als OER über Plattformen wie ZOERR können sie auch nach dem Projektende noch genutzt, angepasst und weiterentwickelt werden. Insgesamt zeigen die im Projekt entwickelten Fortbildungsangebote und Unterrichtsmaterialien, dass adaptiver digital-gestützter Unterricht ein vielversprechender Weg ist,

um unterschiedlichen Lernvoraussetzungen im Rahmen eines zukunftsorientierten MINT-Unterrichts gerecht zu werden.

7. Literatur

- Bohl, T. (2023). Umgang mit Heterogenität im Unterricht: Forschungsbefunde und didaktische Implikationen. In T. Bohl, J. Budde, & M. Rieger-Ladich (Hrsg.), *Umgang mit Heterogenität in Schule und Unterricht: Grundlagentheoretische Beiträge, empirische Befunde und didaktische Reflexionen* (2. Aufl., S. 263–279). Julius Klinkhardt.
<https://doi.org/10.36198/9783838559667>
- Budde, J. (2017). Heterogenität: Entstehung, Begriff, Abgrenzung. In T. Bohl, J. Budde, & M. Rieger-Ladich (Hrsg.), *Umgang mit Heterogenität in Schule und Unterricht: Grundlagentheoretische Beiträge, empirische Befunde und didaktische Reflexionen* (S. 15–30). Julius Klinkhardt.
- Bonsen, M., & Rolff, H.-G. (2006). Professionelle Lerngemeinschaften von Lehrerinnen und Lehrern. *Zeitschrift für Pädagogik*, 52(2), 167–84.
<https://doi.org/10.25656/01:4451>
- Corno, L. (2008). On teaching adaptively. *Educational Psychologist*, 43(3), 161–173.
<https://doi.org/10.1080/00461520802178466>
- Franke, U., & Schulte, R. (2025). *Adaptiver, digital gestützter Unterricht: Wie kann der Umgang mit Heterogenität im Klassenzimmer erfolgreich gestaltet werden?* schule-mal-digital.de.
- Kalyuga, S., Ayres, P., Chandler, P., & Sweller, J. (2003). The expertise reversal effect. *Educational Psychologist*, 38(1), 23–31.
https://doi.org/10.1207/S15326985EP3801_4
- MINT-ProNeD (2025a). MINT-ProNeD: Adaptiver Unterricht mit digitalen Medien [Repository]. In *Zentrales Open Educational Resources Repository der Hochschulen in Baden-Württemberg ZOERR*. Abgerufen am 31. Mai 2025 von <https://tinyurl.com/mryyfu8t>
- MINT-ProNeD (2025b). Moodle-Selbstlernkurs „Adaptiver digital-gestützter Unterricht“ [Online-Kurs]. In *Zentrum für Schulqualität und Lehrerbildung Baden-Württemberg*. Moodle Lehrerfortbildung-BW. Abgerufen am 31. Mai 2025 von <https://moodle.lehrerfortbildung-bw.de/course/view.php?id=5860>
- Ohl, U., & Mehren, M. (2016). Diagnose – Grundlage gezielter Förderung im Geographieunterricht. *Geographie aktuell und Schule*, 38(224), 4–13.
- Robert Bosch Stiftung (2024). *Deutsches Schulbarometer: Befragung Lehrkräfte. Ergebnisse zur aktuellen Lage an allgemein- und berufsbildenden Schulen*. Robert Bosch Stiftung.
- Schrader, F.-W. (2013). Diagnostische Kompetenz von Lehrpersonen. *Beiträge zur Lehrerbildung*, 31(2), 154–165.
<https://doi.org/10.25656/01:13843>
- Sibley, L., Fabian, A., Plicht, C., Wettke, C., Backfisch, I., Bohl, T., & Lachner, A. (2023). Gestaltung adaptiver Lernumgebungen mit Hilfe digitaler Medien: Ein Werkstattbericht aus dem Tübinger Entwicklungs- und Forschungsprojekt „DiA:GO“. *Lehren & Lernen*, 49(3), 29–33.
- Sibley, L., Lachner, A., Plicht, C., Fabian, A., Backfisch, I., Scheiter, K., & Bohl, T. (2024). Feasibility of adaptive teaching with technology: Which implementation conditions matter? *Computers and Education*, 219, 105108.
<https://doi.org/10.1016/j.compedu.2024.105108>
- Trautmann, M., & Wischer, B. (2011). *Heterogenität in der Schule: Eine kritische Einführung*. VS Verlag für Sozialwissenschaften.
<https://doi.org/10.1007/978-3-531-92893-7>
- Vock, M., & Gronostaj, A. (2017). *Umgang mit Heterogenität in Schule und Unterricht*. Friedrich-Ebert-Stiftung, Abteilung Studienförderung.
- Vygotsky, L. S. (1978). *Mind in society: The development of higher mental processes*. Harvard University Press.

Danksagung

Unser herzlicher Dank gilt Dr. Christine Plicht für ihre Unterstützung bei der Videoproduktion für den Selbstlernkurs und die Möglichkeit, dafür eine Unterrichtsstunde im Fach Mathematik begleiten zu dürfen. Robin Roth danken wir herzlich für die engagierte und konstruktive Zusammenarbeit im Rahmen der Professionellen Lerngemeinschaft, durch die praxisnahe digitale Unterrichtsmaterialien zur Optik entstanden sind.

Hinweis

Die vorliegende Veröffentlichung ist im Rahmen des BMBF-geförderten Verbundprojekts MINT-ProNeD als Teil des Kompetenzzentrums MINT im Kompetenzverbund lernen:digital entstanden.

Der Kompetenzverbund lernen:digital wird finanziert durch die Europäische Union – NextGenerationEU und gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung. Weitere Informationen finden Sie unter <https://lernen.digital>. Die geäußerten Ansichten und Meinungen sind ausschließlich die der Autor/innen und spiegeln nicht unbedingt die Ansichten der Europäischen Union, Europäischen Kommission oder des Bundesministeriums für Bildung und Forschung wider. Weder Europäische Union, Europäische Kommission noch das Bundesministerium für Bildung und Forschung können für die geäußerten Ansichten und Meinungen verantwortlich gemacht werden.

Online-Selbstlernkurs zu digitalen Medien im Physikunterricht

David Weiler*, Jan-Philipp Burde*, Kasim Costan⁺, Rike Gieshoff[§], Christoph Kulgemeyer⁺,
Armin Lässer[⊖], Katja Plicht[§], Josef Riese[§], Thomas Schubatzky[⊖]

*Universität Tübingen, AG Didaktik der Physik, Auf der Morgenstelle 14, 72076 Tübingen, Deutschland;

⁺Universität Bremen, Didaktik der Physik, Otto-Hahn-Allee 1, 28359 Bremen, Deutschland;

[§]Universität Paderborn, Didaktik der Physik, Warburger Straße 100, 33098, Paderborn, Deutschland;

[⊖]Universität Innsbruck, Didaktik der Physik, Fürstenweg 176, 6020, Innsbruck, Österreich;

david-christoph.weiler@uni-tuebingen.de

Kurzfassung

Die fortschreitende Digitalisierung bringt große Herausforderungen für die Aus- und Weiterbildung von Lehrkräften mit sich. Während angehende Lehrkräfte bereits von neuen Entwicklungen in der Ausbildung profitieren, sind viele aktive Lehrkräfte bislang nicht ausreichend auf die digitalen Möglichkeiten im Unterricht vorbereitet. Der Kompetenzverbund lernen:digital setzt genau hier an und unterstützt gezielt Lehrkräfte beim Erwerb digitalisierungsbezogener Kompetenzen. Im Rahmen des Verbundprojekts ComeMINT wurde unter anderem ein Online-Selbstlernkurs entwickelt, der sich mit dem Einsatz digitaler Medien im Physikunterricht befasst. Grundlage des Kurses bilden zum einen eine Bedürfnisanalyse unter praktizierenden Physiklehrkräften und zum anderen bereits bestehende Materialien aus der Lehrkräfteausbildung. Der Kurs vermittelt grundlegende Kompetenzen im Umgang mit physikspezifischen digitalen Medien, wie zum Beispiel digitaler Messwerterfassung, Augmented Reality oder Simulationen. In diesem Beitrag werden die Entwicklung und die Inhalte des Selbstlernkurses skizziert, sowie die nachhaltige Aufbereitung der Materialien zur Nachnutzung dargestellt.

1. Ausgangslage

Die zunehmende Digitalisierung der Gesellschaft stellt auch das System Schule mitsamt Lehrkräftebildung vor große Herausforderungen. Vielerorts können digitale Medien, die insbesondere für den mathematisch-naturwissenschaftlichen Unterricht bereichernd sein können (Hillmayr et al., 2020), nicht eingesetzt werden, da die IT-Infrastruktur und Ausstattung der Schulen (Eickelmann et al., 2019) unzureichend ist. Durch Anstrengungen von Bund und Ländern, wie dem „DigitalPakt Schule“ (BMBF, 2019) konnte in den letzten Jahren dieser Missstand verbessert werden, auch wenn Deutschland noch unter dem internationalen Durchschnitt liegt (Niemann et al., 2024).

Das reine Vorhandensein bzw. der Einsatz digitaler Medien allein sind jedoch noch kein Garant für eine hohe Unterrichtsqualität unter Nutzung digitaler Medien. Um das Potential digitaler Medien im Unterricht ausschöpfen zu können, ist es notwendig, dass Lehrkräfte Kompetenzen zum fachdidaktisch begründeten Einsatz digitaler Medien besitzen (Backfisch et al., 2020). Knapp zwei Drittel der in der ICILS 2023 Studie befragten Lehrkräfte unter 35 Jahren, also die Lehrkräfte, die erst in den letzten Jahren ihre Ausbildung abgeschlossen haben, gaben an, fach- oder mediendidaktische Ansätze zum Einsatz digitaler Medien im Unterricht im Studium behandelt zu haben (Drossel et al., 2024). Viele langjährig praktizierende Lehrkräfte geben an, dass sie auf den fachdidaktisch begründeten Einsatz digitaler Medien im Unterricht

während ihres Studiums nicht vorbereitet wurden (Eickelmann et al., 2019) und auch aktuell sehen noch etwa zweidrittel der in der ICILS 2023 befragten Lehrkräfte in Deutschland ein Bedürfnis nach Fortbildungen zur Integration von digitalen Medien in Lehr- und Lernprozesse (Drossel et al., 2024). Mit Blick auf die Zielgruppe besteht somit ein Bedarf an fachspezifischen Fortbildungen zum Einsatz digitaler Medien im Unterricht (Endberg & Lorenz, 2022).

Um diesem Desiderat zu begegnen, wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) der Kompetenzverbund „lernen:digital“ initiiert, der in mehreren fächergruppenspezifischen Kompetenzzentren evidenzbasierte Fort- und Weiterbildungen zum Einsatz digitaler Medien in der Schule entwickelt. Eine der geförderten Maßnahmen im Kompetenzzentrum MINT ist das ComeMINT-Netzwerk, das forschungsbasierte Fortbildungen zum Einsatz digitaler Medien in den MINT-Fächern entwickelt. Speziell für die Fortbildung von Physiklehrkräften entwickelt das ComeNet Physik als Untereinheit des ComeMINT-Netzwerks Fortbildungsmodulare zum Einsatz unterschiedlicher physikspezifischer digitaler Medien, wie zum Beispiel Digitale Messwerterfassungssysteme (Weiler, Burde, Costan et al., 2024). Diese basieren dabei auf bereits in der Lehrkräfteausbildung eingesetzten und beforschten Materialien (Weiler, Burde, Große-Heilmann et al., 2024). Ein Kernbestandteil der Fortbildungen ist der entwickelte Selbstlernkurs, dessen Entwicklung im folgenden Artikel genauer beleuchtet wird.

2. Entwicklung des Selbstlernkurses

Für die Entwicklung des Fortbildungsangebots wurde sich an bisherigen Erkenntnissen zu Fortbildungen orientiert (z. B. Schulze-Vorberg et al., 2021; Lipowski & Rzejak, 2021; Barzel & Selter, 2015; Desimone, 2009). Ergänzend wurde eine fachspezifische Bedürfnisanalyse unter Physiklehrkräften durchgeführt (Weiler, Burde, Costan et al., 2024), damit die Bedürfnisse der Zielgruppe in die Ausarbeitung mit einbezogen werden konnten.

2.1. Ergebnisse der Bedürfnisanalyse

Die Bedürfnisanalyse wurde 2023 in mehreren Bundesländern in Deutschland und Österreich durchgeführt. Insgesamt nahmen $N = 122$ Lehrkräfte teil.

Es zeigte sich, dass die Lehrkräfte thematisch insbesondere an Schüler:innenexperimenten mit digitalen Medien, so wie an spezifischen digitalen Medien, wie beispielsweise Augmented Reality (AR) und Smartphone-Experimenten, interessiert waren. Als eher uninteressant wurden hingegen Themen wie lernpsychologische Grundlagen zum Einsatz digitaler Medien im Unterricht oder deren gesellschaftliche Relevanz wahrgenommen (Weiler, Burde, Costan et al., 2024).

Dabei wünschten sich die Lehrkräfte insbesondere Präsenzfortbildungen in halbtägigen Veranstaltungen, in denen der Fokus auf dem praktischen Ausprobieren oder didaktischen Einsatzmöglichkeiten liegt. Bei Selbstlernmodulen sollten diese eher kürzer (eher 30 statt 90 Minuten) ausfallen. Individuell zugeschnittene Selbstlernmodule, die nach einer Online-Diagnose fest zugewiesen werden, wurden von den Lehrkräften als am uninteressantesten bewertet (Weiler, Burde, Costan et al., 2024).

Um effektive Fortbildungsformate, die Theorie und Praxis verknüpfen und sich an den Bedürfnissen der Lehrkräfte orientieren (Barzel & Selter, 2015) zu entwickeln, wurde ein Großteil der theoretischen Grundlagen mit kleineren Anwendungsaufgaben in einen hierfür entwickelten Selbstlernkurs verlagert. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Lehrkräfte die einzelnen Module nach einer freiwilligen Eingangsdiagnose frei wählen können, um ihre Selbstbestimmung (Deci & Ryan, 2000) nicht einzuschränken und Selbstlernmodule mit festen Lernpfaden zu vermeiden. Dieser Selbstlernkurs kann den angebotenen Präsenzfortbildungen zeitlich vorausgehen und ist so konzipiert, dass er Unterschiede in Vorerfahrungen sowie im Vorwissen der Zielgruppe ausgleicht. Dies stellt sicher, dass in den Präsenzveranstaltungen möglichst viel Zeit auf das praktische Ausprobieren und die Adaption für den eigenen Unterricht (Guskey & Yoon, 2009) verwendet werden kann.

2.2. Zugrundeliegende Konzeption aus der Lehrkräfteausbildung

Als Grundlage für die inhaltliche Ausgestaltung der Lernmodule des Selbstlernkurses wurde sich für die

Verwendung von Materialien aus dem DiKoLeP-Projekt (Digitale Kompetenzen von Lehramtsstudierenden im Fach Physik) entschieden, die sich bereits in der Lehrkräfteausbildung bewiesen haben (Weiler, Burde, Große-Heilmann et al., 2024). Neben dem Zuwachs im fachdidaktischen Wissen zum Einsatz digitaler Medien konnten diese insbesondere zu einer Steigerung in der Motivation zum Einsatz digitaler Medien im späteren Physikunterricht bei den Studierenden beitragen. Da insbesondere die Motivation einen Einflussfaktor auf die spätere Häufigkeit und Qualität des Medieneinsatzes im Unterricht hat (Lucas et al., 2021), eigneten sich diese Materialien besonders für das Vorhaben.

Die zugrunde liegende Konzeption sieht eine Zweiteilung in eine theoretische Auseinandersetzung und eine praktische Umsetzung vor. Im theoretischen Teil werden zuerst grundlegende Aspekte des Lernens mit digitalen Medien thematisiert, bevor einzelne, für den Physikunterricht typische digitale Medien diskutiert werden. Dabei stehen Gestaltungs-kriterien, Einsatzszenarien und empirische Befunde im Fokus der Behandlung.

Der zweite Teil der Konzeption aus dem DiKoLeP-Projekt sieht eine praktische Auseinandersetzung vor. Um dem Bedürfnis der Lehrkräfte nach einem praktischen Ausprobieren in Präsenzanteilen nachzukommen, für welche zum Teil Experimentieraufbauten und -materialien benötigt werden, wurde dieser Teil in die Präsenzfortbildungen übernommen.

3. Selbstlernkurs

Aufbauend auf den DiKoLeP-Materialien wurden Selbstlernmodule zu den einzelnen digitalen Medien ausgearbeitet. Dabei werden zum Teil manche digitalen Medien in eine Grundlektion und eine Vertiefungslektion aufgeteilt, sodass 14 Lektionen entstanden. Mit den Angeboten auf unterschiedlichem Niveau können die Vorerfahrungen der Lehrkräfte bei der Befassung mit dem jeweiligen digitalen Medium berücksichtigt werden. Nach der Einführung in digitale Medien allgemein haben die Lehrkräfte die freie Wahl, welche Module sie bearbeiten wollen, um das Autonomieerleben der Lehrkräfte nicht einzuschränken. Ergänzend steht den Lehrkräften die Möglichkeit einer freiwilligen Eingangsdiagnostik zur Verfügung, die neben dem fachdidaktischen Wissen zum Einsatz digitaler Medien (Große-Heilmann et al., 2022) auch motivationale Einstellungen (Vogelsang et al., 2019) berücksichtigt und daraufhin Empfehlungen für die Belegungen von Kursmodulen gibt.

Der Aufbau der Module folgt dabei immer einer ähnlichen Struktur, wobei Instruktionsvideos das hauptsächlichste Medium zum Vermitteln der Inhalte sind. Nach einer Einführung in das jeweilige digitale Medium werden Gestaltungsmerkmale für den Einsatz im Unterricht diskutiert, die bei der Umsetzung berücksichtigt werden sollten. Neben Einsatzbeispielen für den eigenen Unterricht wird wenn möglich die Gelegenheit geschaffen, mit dem Medium selbst erste

Erfahrungen zu sammeln. Dies ist zum Beispiel bei Simulationen möglich, da diese am Computer direkt bearbeitet werden können. Hingegen können digitale Messwerterfassungssysteme nicht versendet und direkt ausprobiert werden. Sofern die aktuelle Forschung dies zulässt, werden ebenfalls empirische Befunde zum Einsatz der Medien vorgestellt.

Angereichert ist der Kurs mit Aufgaben zur Überprüfung des eigenen Wissens über die didaktische Potenziale der Medien im Unterricht, Transkripten der Videos und der Möglichkeit über ein Forum in den Austausch unter den Kursteilnehmenden zu kommen. Es wurde sich dabei für die Plattform iMoox.at entschieden, da diese zum einen in Österreich bereits stark für die Lehrkräftefortbildung eingesetzt wird und zum anderen die Möglichkeit bietet, Zertifikate nach Abschlussstests für die einzelnen Lektionen auszustellen.



Abb. 1: QR-Code zum Selbstlernkurs auf iMoox.at (<https://imoox.at/course/digitalerPhysikunterricht>)

Der Online-Selbstlernkurs ist am 01. November 2024 frei geschaltet worden und hat Ende Mai 2025 über 200 Kursteilnehmende. Die Anmeldung ist kostenlos und benötigt nur einen Account auf iMoox.at. Im Folgenden werden die Inhalte zu den einzelnen digitalen Medien kurz beschrieben.

3.1. Einführung

Die Einführung zum Einsatz digitaler Medien im Physikunterricht klärt zum einen über die Rolle der digitalen Medien im Physikunterricht auf, deren Wirksamkeit (Hillmayr et al., 2020), thematisiert zum anderen aber auch lernpsychologische Grundlagen wie etwa die Theorie zum Multimedialen Lernen (Mayer, 2009). Konkret wird die Sinnhaftigkeit des Einsatzes digitaler Medien am SAMR-Modell (Puentedura, 2006) eingeordnet und auf weiterführende Materialien (wie z. B. Girwidz, 2020) hingewiesen, die zur Vertiefung in die Thematik genutzt werden können. Die Bearbeitung dauert zwischen 30 und 45 Minuten.

3.2. Erklärvideos

Im Modul zu Erklärvideos werden auf Studien basierende Gestaltungsmerkmale guter Erklärvideos (Kulgemeyer, 2018) vorgestellt, die für die Auswahl oder Erstellung solcher Videos relevant sind. Darüber

hinaus werden konkrete Einsatzmöglichkeiten für den Physikunterricht benannt (Wolf & Kulgemeyer, 2016), die über den reinen Ersatz des Lehrkraftvortrags hinausgehen. Zudem werden auch kritische Forschungsergebnisse, wie die Verstärkung von Fehlvorstellungen (Kulgemeyer & Wittwer, 2022) diskutiert. Die Lehrkräfte sollen mit Anwendungsaufgaben zu Gestaltungsmerkmalen anhand von Beispielvideos für die Sorgfältige Auswahl von Erklärvideos sensibilisiert werden. Die Bearbeitung dauert circa 35 Minuten.

3.3. Simulationen und Animationen

Das Modul zu Simulationen und Animationen ist zum einen aufgeteilt in eine Grundlagenlektion und eine Vertiefungslektion, zum anderen wird aber auch inhaltlich bei den Gestaltungsmerkmalen zwischen Animationen und Simulationen unterschieden. Neben empirischen Befunden zum Einsatz von Simulationen im Physikunterricht (z. B. Rutten et al., 2012 oder Wörner et al., 2022), werden auch viele Quellen für Simulationen aufgezeigt und in Anwendungsaufgaben auf die Designprinzipien des Multimedialernens und das SAMR-Modell aus dem Einführungsmodul rekuriert. Zudem wird sich intensiv mit der Arbeitsblattgestaltung für den Einsatz von Simulationen beschäftigt (Carpenter & Chasteen, 2016). Die Bearbeitung dauert mit der Vertiefung etwa 60 Minuten, kann aber in zweimal 30 Minuten aufgeteilt werden.

3.4. Digitale Messwerterfassung

Das Modul zur digitalen Messwerterfassung untergliedert sich in einen Grundlagenteil und eine Vertiefungslektion. In der Grundlagenlektion werden unterschiedliche Systeme der digitalen Messwerterfassung klassifiziert (z. B. in fertige Messwerterfassungssysteme oder Mikrocontroller) und sich mit Einsatzmöglichkeiten (Lampe et al., 2015) und was dabei zu berücksichtigen ist beschäftigt. In der Vertiefungslektionen werden diese Einsatzmöglichkeiten weiter ausgeweitet und anhand eines Unterrichtsbeispiels mit dazugehörigem Material Unterrichtsszenarien zwischen analoger und digitaler Umsetzung bewertet. Die Bearbeitung dauert 30 Minuten, mit Vertiefung hingegen 45 Minuten. Die folgenden Module zur Videoanalyse, Smartphones und Mikrocontroller können als Vertiefung zur digitalen Messwerterfassung behandelt werden.

3.5. Smartphones im Physikunterricht

Durch die Nutzung von phyphox ermöglicht dieses Lernmodul, dass Lehrkräfte bei der Bearbeitung der Instruktionvideos auch parallel experimentieren können. So geht das Modul über die Einführung und theoretische Behandlung von Einsatzbeispielen hinaus und ermöglicht einfache Experimente mit digitaler Messwertaufnahme zuhause. Zudem werden neben empirischen Befunden (z. B. Hochberg et al., 2018) zum Einsatz von Smartphones auch weiterführende Materialien mit zahlreichen Anwendungsbeispielen (z. B. Wilhelm & Kuhn, 2021) zur Verfügung

gestellt. Dieses Modul dauert etwa 30 Minuten in der Bearbeitung.

3.6. Videoanalyse

Die Videoanalyse wird anhand unterschiedlicher Programme im zugehörigen Modul eingeführt und mit einem konkreten Unterrichtsbeispiel und einer Schritt-für-Schritt-Anleitung nähergebracht. Dabei werden mögliche Fehlerquellen bei der praktischen Umsetzung und empirische Erkenntnisse (z. B. Becker et al., 2019) diskutiert. Das Modul kann in etwa 30 Minuten abgeschlossen werden.

3.7. Mikrocontroller

Im Modul zu Mikrocontrollern werden unterschiedliche Arten von Mikrocontrollern und deren gängigen Einsatzszenarien in der Schule thematisiert. Durch die Verwendung von Online-Simulationen von Mikrocontrollern können erste Programmiersuche von den Lehrkräften unternommen werden. Neben Unterrichtsbeispielen (z. B. Pusch et al., 2021) und einer Diskussion der Vor- und Nachteile beim Einsatz von Mikrocontrollern im Physikunterricht, stehen den Lehrkräften auch ein Skript zur Einführung in den Arduino Uno und einiger Sensoren und Aktoren, sowie Beispielprogramme zur Verfügung. Die Inhalte können in etwa 45 Minuten erarbeitet werden.

3.8. Interaktive Bildschirmexperimente

Auch die Interaktiven Bildschirmexperimente sind in eine Grundlektion und eine Vertiefungslektion aufgeteilt. Neben Beispielen für Interaktive Bildschirmexperimente wird sich auch mit der Forschungslage (z. B. Brell, 2008) und diversen Repositorien wie tetfolio der FU Berlin beschäftigt. Vertieft wird sich hier insbesondere mit der Abgrenzung zu anderen digitalen Medien und einer Auseinandersetzung von Gestaltungsmerkmalen von Interaktiven Bildschirmexperimenten und der Theorie zum Multimedialen Lernen. Die Bearbeitungszeit liegt zwischen 35 und 45 Minuten.

3.9. Augmented Reality

Neben einer Einführung in AR bietet dieses Modul eine tiefgreifende theoretische Auseinandersetzung mit den Feinheiten der Unterschiede im Kontinuum zwischen Real Environment und Virtual Environment, indem sich AR verorten lässt (Teichrow & Erb, 2020). Zudem werden konkrete Beispiele für den Physikunterricht vorgestellt und demonstriert, sowie die empirisch noch uneindeutige Befundlage zur Wirksamkeit von AR (z. B. Altmeyer et al., 2020) diskutiert. Die Bearbeitung des Moduls dauert etwa 30 Minuten.

3.10. Mathematische Modellbildung

Das Selbstlernmodul zur mathematischen Modellbildung bietet neben einer Einführung in die Thematik, sowie aktuellen empirischen Befunden (z. B. Weber, 2022) die Möglichkeit unterschiedliche Formen der mathematischen Modellbildung zu explorieren.

Dabei werden sowohl für die tabellarische Modellbildung mit Excel als auch die graphische Modellbildung mit Dynasys Schritt-für-Schritt-Anleitungen gegeben, um die Einstiegshürde niedrig zu halten. Die Auseinandersetzung mit mathematischer Modellbildung wird unter anderem mit einem Vergleich zu anderen digitalen Medien vertieft. Das Modul kann innerhalb von etwa 35 Minuten abgeschlossen werden.

4. Veröffentlichung als OER-Materialien

Der Selbstlernkurs ist mit der iMoox-Plattform auch noch die nächsten Jahre sicher für Lehrkräfte zu erreichen. Da die entwickelten Produkte in Form von Videos, Vortragsfolien, Literatur, Skripte und interaktiven Quizen auch nach dem Projektende zur Weiterentwicklung zur Verfügung stehen und dabei adaptierbar bleiben sollen, wurden die Materialien auf WirLernenOnline.de hochgeladen. Dabei wurde eine Übersichtsseite (Eltern-Ressource; erreichbar über den Link, der in Abb. 2 hinterlegt ist) angelegt, die das Nutzungskonzept des Fortbildungskurses „Einsatz digitaler Medien im Physikunterricht“ und die Unterseiten (Child-Elemente) zu den einzelnen Modulen des Fortbildungskurses enthält. Die Unterseiten enthalten alle entwickelten Produkte des Selbstlernkurses zu jeweils einem digitalen Medium (z. B. zu Mikrocontrollern oder Simulationen). In den Child-Elementen finden sich zusätzlich zu den Materialien auch Nutzungskonzepte, wie der Einsatz des jeweiligen Moduls gedacht ist.



Abb. 2: QR-Code zur Eltern-Ressource des Selbstlernkurses auf WirLernenOnline.de (<https://redaktion.wirlernenonline.de/education/sharing/components/render/8a7dd209-a280-4a05-b23f-4f3e5cf80582>)

Die Materialien sind als CC-BY-SA lizenziert und können somit weitergenutzt, bearbeitet und unter gleicher Lizenz wieder verbreitet werden. Dies ermöglicht die Einbindung und Aktualisierbarkeit für Lehrkräfteaus- und fortbildende in eigene Veranstaltungen und Kurse.

5. Ausblick

Ergänzend zum Selbstlernkurs wurden Präsenzfortbildungen konzipiert und in den Jahren 2024 und 2025 angeboten. Die medienspezifischen

Fortbildungen mit einem hohen Anteil an Möglichkeiten zum praktischen Ausprobieren der Medien, kollaborativer Unterrichtsplanung und gemeinsamer Reflexion in weiteren (Online-)Terminen werden in Plicht et al. (in Vorbereitung) vorgestellt.

Darüber hinaus werden sowohl der iMoox-Kurs als auch die OER-Materialien auf WirLernenOnline.de um zwei weitere Module zu den Themen 3D-Druck und Künstliche Intelligenz (KI) durch Kolleg:innen der Universität zu Köln ergänzt. Der neu aufgelegte iMoox-Kurs ist ab dem 1. September 2025 über die bisherige Kurs-URL (siehe Abb. 1) zu erreichen.

6. Literatur

- Altmeyer, K., Kapp, S., Thees, M., Malone, S., Kuhn, J., & Brünken, R. (2020). The use of augmented reality to foster conceptual knowledge acquisition in STEM laboratory courses—Theoretical background and empirical results. *British Journal of Educational Technology*, *51*(3), 611–628. <https://doi.org/10.1111/bjet.12900>
- Backfisch, I., Lachner, A., Hische, C., Loose, F., & Scheiter, K. (2020). Professional knowledge or motivation? Investigating the role of teachers' expertise on the quality of technology-enhanced lesson plans. *Learning and Instruction*, *66*, 101300. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2019.101300>
- Barzel, B., & Selter, C. (2015). Die DZLM-Gestaltungsprinzipien für Fortbildungen. *Journal für Mathematik-Didaktik*, *36*(2), 259–284. <https://doi.org/10.1007/s13138-015-0076-y>
- Becker, S., Klein, P., Gößling, A. & Kuhn, J. (2019). Förderung von Konzeptverständnis und Repräsentationskompetenz durch Tablet-PC-gestützte Videoanalyse. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, *25*(1), 1-24.
- BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung). (2019). *Verwaltungsvereinbarung DigitalPakt Schule 2019 bis 2024*. https://www.digitalpaktschule.de/files/VV_DigitalPaktSchule_Web.pdf
- Brell, C. (2008). *Lernmedien und Lernerfolg—Reale und virtuelle Materialien im Physikunterricht: Empirische Untersuchungen in achten Klassen an Gymnasien (Laborstudie) zum Computereinsatz mit Simulation und IBE* (Bd. 74). Logos-Verl.
- Carpenter, Y. & Chasteen, S. (2016). *How can I design an effective in-class student worksheet for PhET simulations?* <https://www.physport.org/recommendations/Entry.cfm?ID=93339> (letzter Zugriff am 23.11.21).
- Deci, E. L., & Ryan, R. M. (2000). The „What“ and „Why“ of Goal Pursuits: Human Needs and the Self-Determination of Behavior. *Psychological Inquiry*, *11*(4), 227–268. https://doi.org/10.1207/S15327965PL1104_01
- Desimone, L. M. (2009). Improving Impact Studies of Teachers' Professional Development: Toward Better Conceptualizations and Measures. *Educational Researcher*, *38*(3), 181–199. <https://doi.org/10.3102/0013189X08331140>
- Drossel, K., Gerick, J., Niemann, J., Eickelmann, B., & Domke, M. (2024). Die Perspektive der Lehrkräfte auf das Lehren mit digitalen Medien und die Förderung des Erwerbs computer- und informationsbezogener Kompetenzen in Deutschland im internationalen Vergleich. In B. Eickelmann, N. Fröhlich, W. Bos, J. Gerick, F. Goldhammer, H. Schaumburg, K. Schwippert, M. Senkbeil, J. Vahrenhold, & W. Bos (Hrsg.), *ICILS 2023 #Deutschland: Computer- und informationsbezogene Kompetenzen und Kompetenzen im Bereich Computational Thinking von Schüler*innen im internationalen Vergleich*. Waxmann.
- Eickelmann, B., Bos, W., Gerick, J., Goldhammer, F., Schaumburg, H., Schwippert, K., Senkbeil, M., & Vahrenhold, J. (Hrsg.). (2019). *ICILS 2018 #Deutschland. Computer- und informationsbezogene Kompetenzen von Schülerinnen und Schülern im zweiten internationalen Vergleich und Kompetenzen im Bereich Computational Thinking*. Waxmann.
- Endberg, M., & Lorenz, R. (2022). Selbsteingeschätzte Kompetenzen von Lehrpersonen der Sekundarstufe I zum Einsatz digitaler Medien im Unterricht im Bundesländervergleich 2021 und im Trend seit 2017. In R. Lorenz, S. Yotyodying, B. Eickelmann, & M. Endberg (Hrsg.), *Schule digital—Der Länderindikator 2021: Lehren und Lernen mit digitalen Medien in der Sekundarstufe I in Deutschland im Bundesländervergleich und im Trend seit 2017* (1. Auflage, S. 89–115). Waxmann.
- Girwidz, R. (2020). Multimedia und digitale Medien im Physikunterricht. In E. Kircher, R. Girwidz, & H. E. Fischer (Hrsg.), *Physikdidaktik | Grundlagen* (S. 457–527). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-59490-2_13
- Große-Heilmann, R., Riese, J., Burde, J.-P., Schubatzky, T., & Weiler, D. (2022). Fostering Pre-Service Physics Teachers' Pedagogical Content Knowledge Regarding Digital Media. *Education Sciences*, *12*(7), 440. <https://doi.org/10.3390/educsci12070440>
- Guskey, T. R., & Yoon, K. S. (2009). What Works in Professional Development? *Phi Delta Kappan*, *90*(7), 495–500. <https://doi.org/10.1177/003172170909000709>
- Hillmayr, D., Ziernwald, L., Reinhold, F., Hofer, S. I., & Reiss, K. M. (2020). The potential of digital tools to enhance mathematics and science learning in secondary schools: A context-specific meta-analysis. *Computers & Education*,

- 153, 103897. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2020.103897>
- Hochberg, K., Kuhn, J., & Müller, A. (2018). Using Smartphones as Experimental Tools—Effects on Interest, Curiosity, and Learning in Physics Education. *Journal of Science Education and Technology*, 27(5), 385–403. <https://doi.org/10.1007/s10956-018-9731-7>
- Kulgemeyer, C. (2018). Towards a framework for effective instructional explanations in science teaching. *Studies in Science Education*, 54(2), 109–139. <https://doi.org/10.1080/03057267.2018.1598054>
- Kulgemeyer, C., & Wittwer, J. (2022). Misconceptions in Physics Explainer Videos and the Illusion of Understanding: An Experimental Study. *International journal of science and mathematics education*, 1–21. <https://doi.org/10.1007/s10763-022-10265-7>
- Lampe, H.-U., Liebner, F., Urban-Woldron, H., & Tewes, M. (2015). *Innovativer naturwissenschaftlicher Unterricht mit digitalen Werkzeugen: Experimente mit Messwerterfassung in den Fächern Biologie, Chemie, Physik* (1. Aufl.). Seeberger.
- Lipowsky, F., & Rzejak, D. (2021). *Fortbildungen für Lehrpersonen wirksam gestalten: Ein praxisorientierter und forschungsgestützter Leitfaden*. <https://doi.org/10.11586/2020080>
- Lucas, M., Bem-Haja, P., Siddiq, F., Moreira, A., & Redecker, C. (2021). The relation between in-service teachers' digital competence and personal and contextual factors: What matters most? *Computers & Education*, 160, 104052. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2020.104052>
- Mayer, R. E. (2009). *Multimedia Learning* (2. Aufl.). Cambridge University Press.
- Niemann, J., Eickelmann, B., Schaumburg, H., & Fröhlich, N. (2024). Technologische Rahmenbedingungen in Schulen in Deutschland im internationalen Vergleich. In B. Eickelmann, N. Fröhlich, W. Bos, J. Gerick, F. Goldhammer, H. Schaumburg, K. Schwippert, M. Senkbeil, J. Vahrenhold, & W. Bos (Hrsg.), *ICILS 2023 #Deutschland: Computer- und informationsbezogene Kompetenzen und Kompetenzen im Bereich Computational Thinking von Schüler*innen im internationalen Vergleich* (S. 255–288). Waxmann.
- Plicht, K., Burde, J.-P., Costan, K., Gieshoff, R., Kulgemeyer, C., Lässer, A., Riese, J., Schubatzky, T., Weiler, D. (in Vorbereitung). *Vom Online-Kurs zur Präsenfortbildung: Zwei-phasiges Fortbildungskonzept zum Einsatz digitaler Medien für Physiklehrkräfte*.
- Puentedura, R. R. (2006, Januar 1). *Transformation, technology, and education in the state of Maine*. http://www.hippasus.com/rpweblog/archives/2006_11.html
- Pusch, A., Ubben, M. S., Laumann, D., Heinicke, S., & Heusler, S. (2021). Real-time data acquisition using Arduino and phyphox: Measuring the electrical power of solar panels in contexts of exposure to light in physics classroom. *Physics Education*, 56(4), 045001. <https://doi.org/10.1088/1361-6552/abe993>
- Rutten, N., van Joolingen, W. R., & van der Veen, J. T. (2012). The learning effects of computer simulations in science education. *Computers & Education*, 58(1), 136–153. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2011.07.017>
- Schulze-Vorberg, L., Krille, C., Fabriz, S., & Horz, H. (2021). Hinweise und Empfehlungen für die Konzeption von Lehrkräftefortbildungen zu digitalen Medien. *Zeitschrift für Erziehungswissenschaft*, 24(5), 1113–1142. <https://doi.org/10.1007/s11618-021-01046-z>
- Teichrow, A., & Erb, R. (2020). Hauptsache Augmented? Klassifikation digitalisierter Experimentierumgebungen. In K. Kaspar, M. Becker-Mrotzek, S. Hofhues, J. König, & D. Schmeinc (Hrsg.), *Bildung, Schule, Digitalisierung* (S. 421–426). Waxmann Verlag GmbH. <https://www.waxmann.com/index.php?eID=download&buchnr=4246#page=421>
- Vogelsang, C., Finger, A., Laumann, D., & Thyssen, C. (2019). Vorerfahrungen, Einstellungen und motivationale Orientierungen als mögliche Einflussfaktoren auf den Einsatz digitaler Werkzeuge im naturwissenschaftlichen Unterricht. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 25(1), 115–129. <https://doi.org/10.1007/s40573-019-00095-6>
- Weber, J. (2022). *Mathematische Modellbildung und Videoanalyse zum Lernen der Newtonschen Dynamik im Vergleich*. Logos Verlag.
- Weiler, D., Burde, J.-P., Costan, K., Große-Heilmann, R., Kulgemeyer, C., Riese, J., & Schubatzky, T. (2024). Förderung digitaler Kompetenzen von Physik-Lehrkräften im ComeNet Physik. *PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*, 1(1), 47–54.
- Weiler, D., Burde, J.-P., Große-Heilmann, R., Lachner, A., Riese, J., & Schubatzky, T. (2024). Evaluation of a university seminar on the use of digital media in the physics classroom. *Journal of Physics: Conference Series*, 2750(1), 012041. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2750/1/012041>
- Wilhelm, T., & Kuhn, J. (with Springer-Verlag GmbH). (2021). *Für alles eine App: Ideen für Physik mit dem Smartphone* (T. Wilhelm & J. Kuhn, Hrsg.; 1. Auflage 2022). Springer Berlin. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-63901-6>
- Wolf, K. D., & Kulgemeyer, C. (2016). Lernen mit Videos? Erklärvideos im Physikunterricht.

Naturwissenschaften im Unterricht Physik,
27(152), 3641.

Wörner, S., Kuhn, J., & Scheiter, K. (2022). The Best of Two Worlds: A Systematic Review on Combining Real and Virtual Experiments in Science Education. *Review of Educational Research*, 003465432210794. <https://doi.org/10.3102/00346543221079417>

Anhang

Ergänzend zu diesem Tagungsbandbeitrag ist das prä-sentierete Poster dem Beitrag auf der PhyDid B Seite angefügt.

Danksagung

Finanziert durch die Europäische Union – NextGenerationEU und gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung unter der FKZ 01JA23M06L. Die geäußerten Ansichten und Meinungen sind ausschließlich die des Autors/der Autorin und spiegeln nicht unbedingt die Ansichten der Europäischen Union, Europäischen Kommission oder des Bundesministeriums für Bildung und Forschung wider. Weder Europäische Union, Europäische Kommission noch Bundesministerium für Bildung und Forschung können für sie verantwortlich gemacht werden.

Ergänzend möchten wir uns bei Moritz Rüller, Projektmitarbeiter in ComeMINT, für die Unterstützung bei der Veröffentlichung der Kurs-Materialien als OER bedanken.

Praxisorientiertes Fortbildungskonzept mit Selbstlerneinheiten zur Quantenphysik

Stefan Aehle*, Kim Kappl⁺, Philipp Scheiger⁺

*Friedrich-Schiller-Universität Jena, August-Bebel-Straße 4, 07743 Jena ⁺Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 57, 70569 Stuttgart
stefan.aehle@uni-jena.de

Kurzfassung

Mit der Einführung neuer Bildungsstandards der KMK für die gymnasiale Oberstufe sind Themen der Quanten- und Atomphysik stärker in den Fokus des Physikunterrichts gerückt. Viele Lehrkräfte sehen sich dabei fachlich wie didaktisch herausgefordert. Um diesen Bedarf aufzugreifen, wurde ein praxisorientiertes Fortbildungskonzept im Blended-Learning-Format entwickelt. Herzstück ist ein strukturierter Moodle-Kurs mit interaktiven Selbstlerneinheiten, ergänzt durch Live-Online-Sitzungen und eine abschließende Präsenzveranstaltung. Die Inhalte orientieren sich an den aktuellen Standards und wurden in Pilotphasen mit Lehrkräften erprobt. Erste Rückmeldungen zeigen ein hohes Maß an Akzeptanz für das flexible und adaptive Fortbildungsformat.

1. Motivation

Mit den neuen Bildungsstandards der Kultusministerkonferenz (KMK) aus dem Jahr 2020 [1] wurden bestimmte Fachinhalte in der gymnasialen Kursstufe der allgemeinen Hochschulreife für alle Bundesländer verbindlich festgelegt. Dabei wurden im Themenbereich „Quantenphysik und Materie“ einige Inhalte implementiert, welche in den wenigsten Lehrplänen der Bundesländer bisher verankert waren, so beispielsweise das quantenmechanische Weltbild hinsichtlich der Begriffe Realität, Lokalität, Kausalität und Determinismus oder aber auch die Koinzidenzmethode zum Nachweis einzelner Photonen.

Des Weiteren ist der konzeptionelle Zugang in die Quantenphysik über die sogenannten „Wesenszüge der Quantenphysik“ nach Rainer Müller und Joseph Küblbeck [2] vielen Lehrkräften immer noch nicht bekannt und wenn sie ihn kennen, gibt es kaum systematische Umsetzungen der fachdidaktischen Innovationen in die konkrete Unterrichtssituation [3]. Dagegen ist der historische Zugang in die Quantenphysik über das Planck'sche Strahlungsgesetz und die Deutung des fotoelektrischen Effekts unter Physiklehrkräften noch sehr verbreitet.

Außerdem mussten Themen aus dem Bereich der Atomphysik, wie beispielsweise der eindimensionale Potentialtopf, in einigen Bundesländern in den letzten Jahren nicht verbindlich unterrichtet werden, halten jetzt aber durch die Implementation der KMK-Bildungsstandards Einzug in die neuen Bildungs- und Lehrpläne.

Aufgrund der hier angeführten Punkte besteht bei vielen Lehrkräften in ganz Deutschland ein hoher Bedarf nicht nur an fachdidaktischen, sondern auch an inhaltlichen Fortbildungen im Bereich der Quanten- und Atomphysik. Um diesem Bedarf an

Fortbildungen gerecht zu werden, entwickeln die AG Fachdidaktik der Physik und Astronomie der Friedrich-Schiller-Universität Jena und die AG Physik und ihre Didaktik der Universität Stuttgart in Kooperation ein Fortbildungskonzept im Blended-Learning-Ansatz.

Im Verlauf dieses Artikels wird eben dieses Fortbildungskonzept, sowie die konkrete Umsetzung genauer beleuchtet. Abschnitt 2 beschreibt das Fortbildungskonzept, Abschnitt 3 den online Selbstlernkurs und Abschnitt 4 eine abschließende Präsenzveranstaltung. In Abschnitt 5 werden erste Erkenntnisse aus Probeläufen beschrieben und die Schlussfolgerungen, die daraus gezogen werden können. Weitere Publikationen gehen exemplarisch fachlich und fachdidaktisch ins Detail [4-6].

2. Das Fortbildungskonzept

Die Fortbildung besteht zu einem großen Teil aus einem Online-Selbststudium. Hierfür wurde ein Moodle-Kurs entwickelt, in welchem die Lehrkräfte alle für die Fortbildung relevanten Inhalte in Form von interaktiven H5P-Dateien zur Verfügung gestellt bekommen.

Nachdem die Lehrkräfte Zugang zum Moodle-Kurs erhalten haben, wird ihnen ein gewisser Zeitraum genannt (ca. drei bis vier Wochen), innerhalb dessen sie sich ein vorher abgestimmtes Thema im Selbststudium erarbeiten sollen. Nach Ablauf des vorgegebenen Zeitraums wird eben dieses Thema in einer Live-Online-Sitzung durch die Dozierenden nochmals erklärt und Zeit für aufkommende Fragen eingeräumt. Des Weiteren dient die Online-Sitzung als Einladung zur Diskussion über die Einbettung des jeweiligen Fachinhalts in den praxisorientierten Unterricht.

Am Ende der Online-Sitzung wird den Lehrkräften ein neues inhaltliches Thema genannt, welches sie sich innerhalb eines neu vorgegebenen Zeitraums

(erneut ca. drei bis vier Wochen) mithilfe der im Moodle-Kurs zur Verfügung gestellten H5P-Dateien erarbeiten sollen. Am Ende des zweiten Zeitraums findet erneut eine Live-Online-Sitzung statt, um Fragen der neuen fachlichen Inhalte im Plenum zu klären.

Dieser Modus wiederholt sich iterativ so lange, bis die für die Lehrkräfte relevanten Inhalte durchgearbeitet wurden. Am Ende wird zusätzlich eine Präsenzveranstaltung an einer der beiden Universitätsstandorte (Stuttgart oder Jena) angeboten, um den teilnehmenden Lehrkräften die Möglichkeit zum Austausch zu geben. Des Weiteren werden Experimente vorgestellt, welche Teil der erlernten theoretischen Fachinhalte waren.

Im folgenden Abschnitt werden die Inhalte des Online-Kurses, in welchem unter anderem die Selbstlerneinheiten zu finden sind, genauer beleuchtet.

3. Der Online-Kurs

Der gesamte Online-Kurs ist gegliedert in die Sinneinheiten

- Fachinhalte Quantenphysik,
- Fachinhalte Atomphysik und Materie,
- Unterrichtsmaterial,
- Weiterführende Links und Verweise.
- Die fachlichen Inhalte wurden dabei in Form von interaktiven H5P-Dateien aufgearbeitet. Dies ist so zu verstehen, dass innerhalb der jeweiligen H5P-Datei immer wieder kleine Zwischenfragen oder Quizze gestellt werden, um die Lernenden zu aktivieren und zum Nachdenken zu animieren. Ein Auszug einer solchen Zwischenaufgabe zur Überprüfung des Lernstands ist in Abbildung 1 am Beispiel einer Koinzidenzzählung zu sehen.

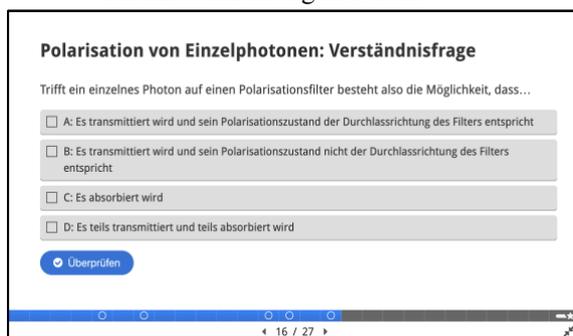


Abb. 1: Aktivierende Elemente fordern die Lernenden zur Interaktion auf, wie hier exemplarisch, eine Frage zur Polarisation von Einzelphotonen. So wird kann der eigene Lernfortschritt selbstständig überprüft werden. [Eigene Darstellung]

Im folgen Verlauf werden die einzelnen Rubriken des Online-Kurses genauer beleuchtet.

Der Abschnitt „Fachinhalte Quantenphysik“ ist dabei in die folgenden Einzelkurse unterteilt:

- Q1: Die Koinzidenzmethode zum Nachweis einzelner Photonen,
- Q2: Die Wesenszüge der Quantenphysik,
- Q3: Die mathematische Beschreibung der Quantenmechanik,
- Q4: Verschränkung und das quantenmechanische Weltbild hinsichtlich der Begriffe Realität, Lokalität, Kausalität und Determinismus,
- Q5: Der fotoelektrische Effekt,
- Q6: Weiterführende Inhalte.

Der Kurs orientiert sich zunächst explizit an den in den KMK-Bildungsstandards erwähnten Begriffen. Zusätzliche Inhalte, wie beispielsweise der mathematische Formalismus der Quantenmechanik oder der fotoelektrische Effekt wurden jedoch ebenfalls in den Kurs integriert, da sie einen wesentlichen Bestandteil zum vertieften Verständnis anderer Inhalte bilden. Andere nicht zu vernachlässigende Inhalte, wie beispielsweise die Heisenbergsche Unschärferelation oder Materiewellen sind im Moment in Bearbeitung und sollen im Laufe des Jahres noch in den Kurs integriert werden.

Der Abschnitt „Fachinhalte Atomphysik und Materie“ besteht aus den folgenden Einzelkursen:

- A1: Die historische Entwicklung des Atombilds,
- A2: Rutherfords Kern-Hülle-Modell,
- A3: Das Bohrsche Atommodell,
- A4: Der Weg zum quantenmechanischen Atommodell,
- A5: Das Wasserstoffatom,
- A6: Energieniveauschemata, Atomübergänge und Spektren,
- A7: Röntgenspektrum,
- A8: Mehrelektronensysteme.

Obwohl einige Inhalte aus dem Bereich der Atomphysik in den Jahren vor dem Beschluss der KMK-Bildungsstandards in einigen Lehrplänen verankert waren (vgl. beispielsweise den Thüringer Lehrplan von 2012 [7]), gibt es auch andere Bundesländer, in denen diese Inhalte in den letzten Schuljahren nicht verbindlich unterrichtet werden mussten (so beispielsweise Baden-Württemberg, siehe Bildungsplan 2016 [8]). Aus diesem Grund wurde sich dafür entschieden, eben diese Fachinhalte dennoch in den Online-Kurs zu integrieren, um ein möglichst breites Publikum an Lehrkräften aus ganz Deutschland anzusprechen.

Die Struktur des Online-Kurses aus mehreren Einzelkursen dient mehreren Zielen. In erster Linie soll dadurch ein adaptives Angebot geschaffen werden, welches die individuelle Lehrkraft genau dort abholt, wo sie gerade steht – neue und vertiefende Inhalte sind wohl attraktiver für

Lehrkräfte, welche bereits einige Erfahrung im eigenen Quantenphysikunterricht gesammelt haben. Eher grundlegende Inhalte, wie beispielsweise die Wesenszüge der Quantenphysik, eignen sich insbesondere für Anfänger, welche noch nie Quantenphysik selbst unterrichtet haben. Es steht den teilnehmenden Lehrkräften also frei, für welche Fachinhalte sie sich interessieren und zu welchen Inhalten sie sich dementsprechend weiterbilden möchten. Des Weiteren bietet das Konzept eines auf längere Zeit zugänglichen Online-Kurses den Vorteil, sich die Inhalte zu einem individuell gewählten Zeitpunkt aneignen zu können. So ist man nicht auf bestimmte feste Termine angewiesen, wie es bei den meisten Fortbildungen der Fall ist, sondern kann sich die Inhalte genau dann erarbeiten, wann Zeit dafür ist. Der Online-Kurs bietet also zusätzlich eine große zeitliche Flexibilität an, wie sie im „klassischen“ Fortbildungsformat nicht möglich wäre.

Nichtsdestotrotz dürfen neben der Bereitstellung verständlich aufgearbeiteter Fachinhalte auch konkrete Vorschläge für den eigenen Unterricht nicht fehlen. Daher sind im Abschnitt „Unterrichtsmaterialien“ vielseitige Materialien zur lizenzfreien Nutzung im Schulunterricht zu finden. So beispielsweise Bilder, Abbildungen und Skizzen von Experimenten und physikalischen Phänomenen, Vorschläge für Tafelbilder und Übungsaufgaben, Versuchsanleitungen, etc.

Zuletzt befinden sich im Abschnitt „Weiterführende Links und Verweise“ Links zu vertiefenden Materialien zur eigenständigen Verwendung, wie beispielsweise das Glossar zu den Grundbegriffen der Quantenphysik von Filk und Fuchs der Universität Freiburg [9] oder andere fachwissenschaftliche Artikel.

Die Einzelkurse sind mit interaktiven H5P-Dateien gefüllt, sodass die Lehrkräfte bei der selbstständigen Erarbeitung der Fachinhalte zwischenzeitlich immer wieder aktiviert werden.

4. Präsenzveranstaltungen

Im Anschluss an die Selbststudienphase und die Online-Sprechstunden wird den Teilnehmenden zusätzlich ein Termin für eine Präsenz Sitzung angeboten. Diese Sitzung findet an einem der beiden Universitätsstandorte Stuttgart oder Jena statt und dient mehreren Zielen:

Einerseits kann vor Ort auf die umfangreichen Universitätsammlung zurückgegriffen werden, um thematisch relevante Experimente zu präsentieren, die in den meisten Schulphysiksammlungen nicht zu finden sind – von bekannten, eher traditionellen Aufbauten aus der Wellenoptik und Atomphysik, bis hin zu modernen Versuchen der Quantenoptik aus aktueller Forschung. So werden Klassiker wie Fotoeffekt, Spektralanalyse und Elektronenbeugung durch Experimente mit Einzelphotonen ergänzt, um das häufig veraltete Fachwissen der Teilnehmenden

aufzufrischen. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf Experimenten mit Licht, da sich mit der Frage nach der Natur des Lichts modellhaft eine Brücke aus der klassischen in die moderne Physik bauen lässt. So wird mit einer Wiederholung klassischer Wellenphänomene wie der Polarisation oder der Interferenz am Doppelspalt gestartet, bevor Analogiemodelle zur Veranschaulichung von Einzelphotonenexperimenten eingesetzt werden. Zuletzt folgen Experimente mit einer echten Einzelphotonenquelle, wodurch beispielsweise die Koinzidenzmethode im Realexperiment demonstriert werden kann.

Die Lehrkräfte haben in den meisten Fällen dabei die Möglichkeit, selbst aktiv zu werden, eigene Versuche durchzuführen, und sich damit einen tieferen Einblick in die Thematik zu erarbeiten. Statt spezielle praktische Fähigkeiten (zum Beispiel die Justage eines Interferometers) vor Ort zu erlernen, um Versuche im eigenen Unterricht zu reproduzieren, zielt der Praxistermin viel stärker auf grundlegendes Verständnis ab. So erarbeiten die Lehrkräfte gemeinsam, wie Fachinhalte experimentell bestätigt werden, welche technischen Umsetzungsmöglichkeiten es gibt, und wie die Versuchsergebnisse didaktisch im Schulunterricht aufgearbeitet werden können. Unterstützung erhalten sie dabei durch die Dozierenden vor Ort, zusätzliches Lehrmaterial, und weiterführenden Quellenverweisen, die im Online-Kurs hinterlegt werden. Immer wieder wird mit den Kollegen abgeschätzt, was im Unterricht machbar ist und was nicht.

Da kostspielige Laborexperimente für eine direkte Umsetzung im Schulunterricht eher weniger interessant sind, müssen während der Präsenzveranstaltung auch Experimente und Unterrichtskonzepte vorgestellt werden, welche für die Lehrkräfte im eigenen Unterricht direkt einsetzbar sind. So bieten sich beispielsweise im Kontext der Wesenszüge der Quantenphysik die Analogieboxen der Friedrich-Schiller-Universität Jena an (s. Abb. 2) [10], die in Kombination mit klassisch-optischen Experimenten und digital verfügbaren Simulationen gut für den Unterricht geeignet sind. Darüber hinaus besteht auch das Angebot, mit der eigenen Schulklasse erneut die Universität zu besuchen und im Rahmen eines Schülerlaborterminals den eigenen Unterricht mit modernen Versuchen zu ergänzen. Für einen solchen Termin fungiert die Präsenzveranstaltung gleichzeitig als fachliche Vorbereitung für die Lehrkraft.

Andererseits bieten Präsenzveranstaltungen wie diese immer auch die Möglichkeit der Vernetzung unter den Kollegen. So entsteht sowohl eine enge Feedbackloop für die wissenschaftliche Entwicklungsarbeit der beteiligten Arbeitsgruppen, die immer wieder die Inhalte der Fortbildung anpassen, als auch eine Datenbank an unterrichtspraktischen Erfahrungen, die die

Lehrenden in der Unterrichtsgestaltung unterstützt. Aus mehreren Umfragen und zahlreichen Einzelgesprächen hat sich immer wieder herausgestellt, dass das ein wesentlicher Aspekt für die Teilnahme an Lehrerfortbildungen ist.



Abb. 2: Analogiemodelle und klassisch-optische Experimente ergänzen die Online-Fortbildungsinhalte im Rahmen der Präsenzveranstaltung und veranschaulichen die komplexen Themen mit schultauglichen Versuchen, hier beispielsweise zum Wesenszug der Stochastischen Vorhersagbarkeit einzelner Quantenobjekte. [Eigene Darstellung]

5. Bisherige Erprobungen und Schlussfolgerungen

Das Fortbildungskonzept wurde bereits mehreren Lehrkräften vorgestellt und in großen Teilen erprobt. Im Verlauf vergangener Semester, in denen immer neue fachdidaktische und unterrichtspraktische Materialien zur Quantenphysik erstellt wurden, ergaben sich viele Möglichkeiten, neues Material zu erproben. Vor allem die Analogiemodelle begleitend zur Erarbeitung der Wesenszüge der Quantenphysik wurden ausführlich getestet und angepasst: in praktischen Unterrichtsversuchen, in Schülerlaborveranstaltungen, in Hands-on-Ausstellungen und auf Fortbildungen anderer Physikdidaktik-Arbeitsgruppen – immer wieder wurden die Materialien vorgestellt, Feedback eingeholt und Schlussfolgerungen zu deren Verbesserung gezogen. Diese Erkenntnisse fließen nun, in Kombination mit anderen Unterrichtsmaterialien und Fachinhalten, in die Konzeption der Lehrerfortbildung ein. Das so entstandene Gesamtpaket bietet den Lehrkräften also eine umfangreiche, ausführliche Sammlung an Inhalten, die flexibel auf die eigenen Bedürfnisse, und die der Lernenden, angepasst werden kann.

Die Lehrerfortbildung im hier vorgestellten Format wird inzwischen intensiv beworben und im ersten Durchlauf durchgeführt. Nach einer ersten Testrunde mit dem Kollegium eines einzelnen Gymnasiums und

einer zweiten Testrunde im Rahmen der 31. Tagen des mathematischen und naturwissenschaftlichen Unterrichts in Thüringen, sind die Veranstaltungen der Fortbildungsreihe nun auf den offiziellen Seiten des Thüringer Instituts für Lehrerfortbildung, Lehrplanentwicklung und Medien (ThILLM) zur Teilnahme ausgeschrieben.

Im Allgemeinen lässt sich aus dem bisher gesammelten Feedback der Teilnehmenden feststellen, dass die Aufbereitung der Selbstlerneinheiten auf Basis der interaktiven H5P-Dateien auf großen Zuspruch trifft. Des Weiteren scheint das Anfangsniveau der jeweiligen Einzelkurse auch gut getroffen zu sein. Allerdings wurden die Fachinhalte im Bereich Quantenphysik von den Lehrkräften teilweise als zu schwierig und zu weit vom Schulunterricht entfernt eingeschätzt. Daraufhin wurden eben diese Themen im Moodle-Kurs so markiert, dass vor der Bearbeitung klar herausgeht, dass bestimmte Themen lediglich zur Vertiefung gedacht sind und damit (ohne direkte Schulunterrichtsrelevanz) eher Hintergrundwissen darstellen. Auch im weiteren Verlauf der Fortbildungsreihe gilt es, die Balance zwischen fachlichem Tiefgang und Unterrichtsnähe zu finden.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Das vorgestellte Fortbildungskonzept adressiert den gestiegenen Bedarf an fundierter Fortbildung im Bereich der Quanten- und Atomphysik durch ein strukturiertes, praxisnahes Blended-Learning-Angebot. Die Kombination aus interaktiven Selbstlerneinheiten, Online-Seminaren und praxisorientierten Präsenzphasen ermöglicht eine flexible und zugleich fundierte Weiterqualifizierung von Lehrkräften. Erste Testrunden bestätigen die Relevanz und Wirksamkeit des Konzepts, wengleich einzelne Inhalte noch stärker auf die Unterrichtspraxis abgestimmt werden müssen.

Das Fortbildungsformat wird im Laufe des Jahres 2025 im Bundesland Thüringen erstmals vollständig erprobt werden. Weitere Erprobungen sind ebenfalls in Baden-Württemberg in Planung.

Aufgrund der Zusammenarbeit mit dem Stifterverband wird der gesamte Moodle-Kurs im Herbst des Jahres 2025 auf dem MINT-Campus zu finden sein.

7. Literatur

- [1] Bildungsstandards im Fach Physik für die allgemeine Hochschulreife. Beschluss der Kultusministerkonferenz vom 18.06.2020: https://www.kmk.org/fileadmin/veroeffentlichungen_beschluesse/2020/2020_06_18-BildungsstandardsAHR_Physik.pdf (Stand: 4/2025)
- [2] Küblbeck, Joseph; Müller, Rainer (2003) Die Wesenszüge der Quantenphysik: Modelle,

- Bilder, Experimente. Köln: Aulis Verlag
Duebne GmbH & Co KG
- [3] Breuer, J.; Vogelsang, C.; & Reinhold, P. (2022): Nutzungsverhalten von Lehrkräften bei der Implementierung einer physikdidaktisch innovativen Unterrichtskonzeption. *ZfDN* 28, 1.
- [4] Aehle, S.; Kappl, K.; Scheiger, P. (2025): Praxisorientiertes Fortbildungskonzept mit Selbstlerneinheiten zur Quantenphysik – Fokus auf die Wesenszüge der Quantenphysik und Analogiemodelle. In: *PhyDid B, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*, 1 (2025)
- [5] Kappl, K.; Aehle, S.; Scheiger, P. (2025): Praxisorientiertes Fortbildungskonzept mit Selbstlerneinheiten zur Quantenphysik - Fokus auf dem Nachweis der Quantennatur des Lichts und der Erzeugung einzelner Photonen - In: *PhyDid B, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*, 1 (2025)
- [6] Scheiger, P.; Kappl, K.; Aehle, S. (2025): Praxisorientiertes Fortbildungskonzept mit Selbstlerneinheiten zur Quantenphysik – Fokus auf Verschränkung und das quantenmechanische Weltbild. In: *PhyDid B, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*, 1 (2025)
- [7] Thüringer Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur (2012) Lehrplan Physik, Gymnasium. Url.: <https://www.schulportal-thueringen.de/media/detail?tspi=2280> (Stand 05/2025)
- [8] Ministerium für Kultus, Jugend und Sport Baden-Württemberg (2016) Bildungsplan des Gymnasiums: Physik. Url.: https://www.bildungsplaene-bw.de/site/bildungsplan/get/documents/lsbw/export-pdf/depot-pdf/ALLG/BP2016BW_ALLG_GYM_PH.pdf (Stand 05/2025)
- [9] Filk, Thomas (2024) Kurztexzte: Quantenphysik. Url: <https://physikdidaktik.uni-freiburg.de/kurztexzte/> (Stand 05/2025)
- [10] Aehle, Stefan; Scheiger, Philipp; Cartarius, Holger (2022) An Approach to Quantum Physics Teaching through Analog Experiments. In: *Physics* (2022), Url: <https://www.mdpi.com/2624-8174/4/4/80> (Stand: 5/2025)

Danksagung

Besonderer Dank gilt dem Stifterverband der deutschen Wissenschaft e.V. der im Rahmen der Quantum-Skills-Initiative das standortübergreifende Projekt der Lehrfortbildung durch seine QuBit-Fellowships für einen zeitgemäßen Quantenunterricht fördert.

Praxisorientiertes Fortbildungskonzept mit Selbstlerneinheiten zur Quantenphysik

- Fokus auf die Wesenszüge der Quantenphysik und Analogiemodelle -

Stefan Aehle*, Kim Kappl⁺, Philipp Scheiger⁺

*Friedrich-Schiller-Universität Jena, August-Bebel-Straße 4, 07743 Jena ⁺Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 57, 70569 Stuttgart
stefan.aehle@uni-jena.de

Kurzfassung

Vertiefend zum vorgestellten Fortbildungskonzept [1] steht in diesem Artikel die Umsetzung der Erarbeitung der Wesenszüge der Quantenphysik, die über interaktive Selbstlernmodule kombiniert mit schulpraktischen Experimenten sowie Analogiemodellen vermittelt werden. Die hybride Herangehensweise mit digitalen Lerneinheiten und praxisnahen Präsenzphasen erlaubt es den Teilnehmenden ihren Lernprozess flexibel selbstzusteuern. Erste Rückmeldungen zeigen hohe Akzeptanz bei Lernenden; Lehrkräfte profitieren besonders von der Verzahnung vertrauter Inhalte mit neuen didaktischen Zugängen. Der multiperspektivische Ansatz stärkt konzeptionelles Verständnis und eröffnet vielfältige Zugänge zum komplexen Thema Quantenphysik. Weitere Vertiefungen zum Fortbildungskonzept finden sich in zusätzlichen Veröffentlichungen [2, 3].

1. Motivation

Seit der Aktualisierung der KMK-Bildungsstandards 2020 [4] und der daraus folgenden sukzessiven Anpassung der Lehr- und Bildungspläne der Länder, ist der Bedarf an Lehrerfortbildungen und praxisnahen Unterrichtsmaterialien für den Quantenphysikunterricht groß. Eine Herausforderung für viele Lehrkräfte ist es dabei nicht nur methodisch vielfältigen Fachunterricht zu geben, sondern vor allem die Fachinhalte selbst aufzufrischen, denn für viele gehörte Quantenphysik nicht zu Ausbildung. Mit dem Ziel, Lehrende möglichst effektiv auf das eigene Unterrichten vorzubereiten und ihnen dabei eine Fülle an geeignetem Material an die Hand zu geben, entsteht in Kooperation der Physikdidaktiken der Universität Stuttgart und Friedrich-Schiller-Universität Jena und Unterstützung vieler Weiterer, ein Fortbildungsangebot mit Selbstlerneinheiten. Dieses bietet Lehrkräften die Möglichkeit, sich räumlich und zeitlich weitgehend selbstständig mit den komplexen Inhalten der Quantenphysik auseinanderzusetzen, Feedback einzubringen, und in Austausch zu treten. Dabei wird das online-Format eines Moodle-Kurses durch Konsultationstermine in Präsenz unterstützt, zu denen neben inhaltlichen Diskussionen auch klassisch-optische Experimente, Analogieversuche, und quantenphysikalische Realexperimente vorgestellt werden.

2. Die Wesenszüge der Quantenphysik als zentrale Fachinhalte

Das Lehrkonzept der Wesenszüge der Quantenphysik nach Rainer Müller und Josef Küblbeck, das Anfang der 2000er Jahre entwickelt und seither in verschiedenen Kontexten evaluiert wurde, ist inzwischen im Bereich der Quantenphysikdidaktik so weit verbreitet, dass es sich in die KMK-

Bildungsstandards von 2020 und folglich in allen Curricula der Bundesländer wiederfindet [5]. Während einige Lehr- und Bildungspläne die Inhalte nur wortgleich wiedergeben, werden sie in anderen auch tatsächlich als Wesenszüge benannt – auch, wenn der Verweis auf das zugrundeliegende Lehrkonzept oft fehlt:

- Stochastische Vorhersagbarkeit
- Eindeutigkeit der Messergebnisse
- Fähigkeit zur Interferenz
- Komplementarität

Aufgrund ihrer wichtigen Stellung im Quantenphysikunterricht, wird den Wesenszügen im hier vorgestellten Fortbildungskonzept ebenfalls ein zentraler Platz gewidmet. Im gleichnamigen Kurs Q2 befinden sich dazu vier Einheiten zu den entsprechenden Inhalten der Vorlage. Die ursprünglichen Inhalte selbst sind bereits in verschiedenen Formaten, von den Autoren aufgearbeitet wurden. So finden sich auf einer zentralen Homepage [6] zum Beispiel Handreichungen und unterstützende Materialien wie Arbeitsblätter und Simulationen. Da diese Materialien inzwischen aber teils veraltet sind und auch nicht an jeden Vorwissensstand nahtlos anknüpfen, wird im Fortbildungsangebot vieles aktualisiert und angepasst. So bieten die interaktiven H5P-Dateien die Möglichkeit, selbstgesteuert zu lernen und sich die Wesenszüge im eigenen Tempo anzueignen. Außerdem wird Hauptfokus auf die Verknüpfung mit Experimenten und Unterrichtspraxis gelegt. So bieten moderne Lehrmittel und Materialien auch Möglichkeiten, die in der Konzeptionsphase der Wesenszüge noch nicht existierten (3D-Druck-Modelle, moderne Simulationen). Zusätzlich besteht immer auch der Anspruch, den Lehrkräften ein Weiterbildungsangebot zu machen,

was über das unterrichtsrelevante Grundwissen hinausgeht, spezielle Themen vertieft und Anknüpfungspunkte für den eigenen Unterricht schafft. Aus diesem Grund werden die Wesenszüge im Rahmen der Fortbildung auch mit aktuellen Realexperimenten der Quantenoptik unterstützt, um Einblick in den Stand der Forschung auf diesem Gebiet zu gewähren.

3. Kombination von Analogiemodellen und klassisch-optischen Versuchen

Um Lehreinheiten zu den Wesenszügen der Quantenphysik gezielt mit Anschauungsmaterial unterstützen zu können ist im Rahmen früherer Projekte ein Analogiemodell entwickelt worden [7, 8]. Dieses versucht die quantenphysikalischen Phänomene, die durch die Wesenszüge beschrieben werden, mit einfachen makroskopischen Elementen greifbar zu machen. Die technische Umsetzung basiert auf NFC-Chips, Arduino-Microcontrollern und einfacher Elektronik, alles umhauert von einer 3D-gedruckten Blackbox (s. Abbildung 1).



Abb. 1: Analogiemodell zu den Wesenszügen der Quantenphysik. Runde NFC-Chips (Photonen) werden in die Blackbox (Polarisationsfilter) eingeworfen. Ein auf ihnen gespeicherter Wert (Polarisationszustand) wird mit dem am Filter eingestellten Wert (Transmissionsrichtung) verglichen. Der Microcontroller im Gehäuse entscheidet nach dem Gesetz von Malus, ob der Chip hinten (Absorption) oder unten (Transmission) ausgegeben wird und gibt diesem die Einstellung des Filters mit (Polarisation). Werden mehrere dieser Boxen übereinander gestapelt lassen sich so modellhafte Versuche zur Stochastischen Vorhersagbarkeit und Eindeutigkeit der Messergebnisse realisieren. [Eigene Abbildung]

Das Modell erlaubt eine grundlegende Mathematisierung des sonst eher phänomenologisch orientierten Quantenphysikunterrichts in dem hier Messergebnisse ausgezählt, Statistiken erstellt und Transmissionswahrscheinlichkeiten für einzelne Photonen berechnet werden können. Die Lernenden erkennen, dass Messungen für einzelne Quantenobjekte vom Zufall bestimmt sind (Absorption oder Transmission des Photons), aber sich in der Statistik gewisse Muster erkennen lassen. So zeigt sich, dass der gleiche \cos^2 -Zusammenhang, der die Winkelabhängigkeit im

Gesetz von Malus bestimmt und aus klassischen Polarisationsversuchen bekannt ist, natürlich auch als Transmissionswahrscheinlichkeit für das einzelne Photon vorliegt. Sowohl im Unterrichtsverlauf mit Schülerinnen und Schülern als auch zum Präsenztermin der Lehrerfortbildung, wird dieses Analogiemodell mit Freihandpolarisationsversuchen und Experimenten zum Gesetz von Malus gepaart, um den Perspektivenwechsel von makroskopischer zu mikroskopischer Ebene herauszuarbeiten. Damit müssen diese Teile der Wesenszüge nicht axiomatisch präsentiert werden, sondern können stückweise selbständig erarbeitet werden. Während das Material so ausgelegt ist, dass es im schulischen Kontext mit Arbeitsblättern und Aufgabenstellungen zur Anwendung kommen kann, ermöglichen die erweiterten Rahmenbedingungen im universitären Kontext auch, dass die Ergebnisse mit quantenphysikalischen Realexperimenten unterstützt werden. Konkret heißt das, dass neben den klassischen Versuchen und Analogiemodellen auch Einzelphotonenexperimente im Schülerlabor angeboten werden, die eine weitere Perspektive eröffnen: Die Ebene der Modellhaftigkeit wird verlassen und reale Messergebnisse aufgenommen, die es zu interpretieren gilt. Zählraten am Hanbury-Brown-Twiss-Aufbau werden ausgewertet und führen (meist) zu dem Schluss, dass einzelne Photon sich tatsächlich nicht aufteilt, sondern nur eine der klassisch-denkbaren Möglichkeiten realisiert – auch wenn Fehlerquoten und technisches Rauschen diskutiert werden müssen. Da sich die theoretischen Grundlagen der Wesenszüge der Quantenphysik an dieser Stelle so gut mit klassischen Versuchen, Analogien und modernen Experimenten verbinden lassen, bietet es sich nur an, auch für Lehr- und Fortbildungsszenarien den Einstieg über die Polarisation von Licht zu wählen. Dementsprechend gibt es auch im Moodle-Raum einen Fokus auf diese Herangehensweise (s. Abbildung 2) bevor anschließend andere Kontexte erörtert werden.

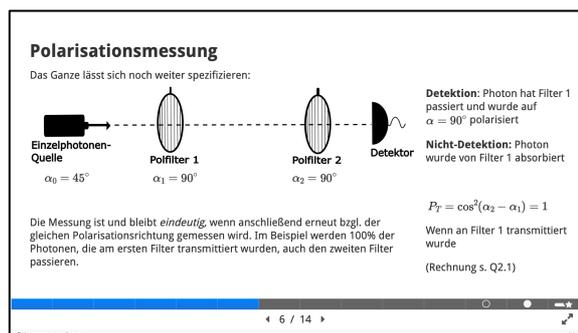


Abb. 2: Beispiel aus der interaktiven Lernumgebung des Moodle-Kurses zur Lehrerfortbildung. Die Wesenszüge der Quantenphysik werden vorerst über die Polarisation von Photonen behandelt, um die Inhalte anschließend mit schulpraktischen Experimenten zu unterstützen. Im späteren Verlauf wird die Thematik vertieft und auch andere Kontexte übertragen. [Eigene Abbildung]

Auch die Wesenszüge Fähigkeit zur Interferenz und Komplementarität werden durch eine Kombination von klassisch-optischen Versuchen und Analogiemodellen eingeführt, bevor die Ergebnisse mit quantenphysikalischen Realexperimenten belegt werden. Das Analogiemodell basiert auf der gleichen Plattform wie für die übrigen Versuche, wird nun jedoch anders präsentiert. Eine einzelne Blackbox steht nun stellvertretend für einen gesamten Interferenzaufbau (Doppelspalt, Michelson-, oder Mach-Zehnder-Interferometer). Im Rahmen der Wesenszüge stellt sich für das einzelne Photon im Interferometer die Frage nach der Verfügbarkeit verschiedener klassisch-denkbare Möglichkeiten, sprich verschiedener „Wege“ von der Quelle bis zum Detektor oder Schirm. Befinden sich in den zwei Strahlengängen beispielsweise zwei gleich ausgerichtete Polarisationsfilter (Differenzwinkel 0°), stehen dem Photon beide Wege ungehindert zur Verfügung – egal in welchen Polarisationszustand es sich befindet. Die Häufigkeitsverteilung wird ein Interferenzmuster ergeben, oder bezogen auf das einzelne Quantenobjekt: Das Photon „trägt zum Interferenzmuster bei“ (Abbildung 3).

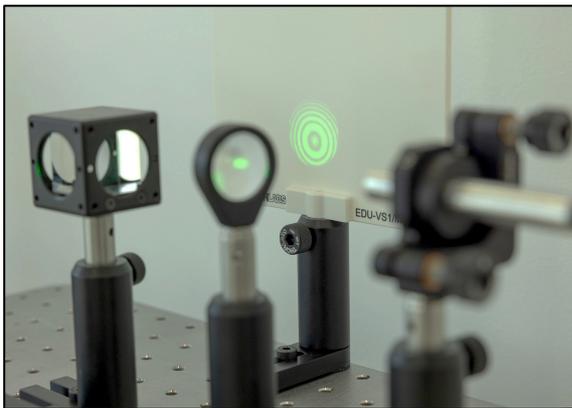


Abb. 3: Interferenz im Michelson-Interferometer. Im Rahmen der Erarbeitung der Wesenszüge Fähigkeit zur Interferenz und Komplementarität werden neben den Analogiemodellen auch hochwertige optische Komponenten genutzt, um experimentelle Feinheiten zu thematisieren. Die Lernenden bekommen somit die Möglichkeit, die eigene methodische Fähigkeiten auszubauen, während Fachinhalte mit anschaulichen Versuchen kombiniert werden. [Eigene Abbildung]

Ein weiterer Spezialfall ergibt sich, wenn eine eindeutige Wegunterscheidbarkeit in den Aufbau gebracht wird, indem beispielsweise einer der beiden Filter orthogonal zum anderen ausgerichtet wird (Differenzwinkel 90°). Das Photon hat damit immer nur eine klassisch-denkbare Möglichkeit den Aufbau zu durchlaufen, denn das Photon, was den 0° -Filter durchlaufen hat, kann auf keinen Fall den 90° -Filter durchlaufen haben und umgekehrt (Absorptionswahrscheinlichkeit 100%). Während man am Doppelspalt mit Polarisationsfiltern für diesen Fall ein Einzelspaltmuster erhalten würde, zeigt sich auch im Interferometer keine Interferenz. Auf das einzelne Photon

übertragen lässt sich sagen, dass es „nicht zum Interferenzmuster beiträgt“. Das Analogiemodell greift nun genau diese Ergebnisse auf: zwei Drehregler erlauben das Einstellen verschiedener Winkelkombinationen von gedachten Polarisationsfiltern in den Strahlengängen, der sich ergebende Differenzwinkel beeinflusst die Messung, und die Messung gibt zwei Möglichkeiten für das Photon. Entweder es „trägt zum Interferenzmuster bei“ (unterer Ausgang) oder es „trägt nicht zum Interferenzmuster bei“ (hinterer Ausgang). Interessant sind nur vor allem wenige Spezialfälle. Neben den beiden oben besprochenen Fällen, in denen 100% der eingegebenen NFC-Chips aus einem der beiden Ausgänge kommen, wäre auch noch ein 50/50-Fall eindeutig bestimmbar und damit prädestiniert zur Diskussion. Dieser ergibt sich bei einer Winkeldifferenz von 45° , sodass die nur die Hälfte der Photonen zum Interferenzmuster beiträgt. Optisch ergibt sich im klassischen Aufbau dann ein kontrastärmeres Interferenzbild, quasi eine Überlagerung beider Spezialfälle. Alle weiteren Winkelkombinationen sind im Rahmen der Versuchsreihen mit Lehrkräften, Schülerinnen und Schülern nicht zwingend zu diskutieren, da sie sich sowohl im Experiment als auch im Modell nur undeutlich abzeichnen. Allerdings lassen sich die Aufbauten noch um einen weiteren Polarisationsfilter vor der Detektionsebene erweitern, um so auch den „Quantenradierer“ zu besprechen [9]. Insbesondere die Erarbeitung des Wesenszugs der Komplementarität und der Frage nach der Welche-Weg-Information werden dadurch bereichert.

Da sich die Diskussion der Wesenszüge und der Wissenstransfer von makroskopischem auch mikroskopischen Kontext oft als Herausforderung darstellt, wird an dieser Stelle auch oft auf die Unterstützung von digitalen Simulationen zurückgegriffen, wie sie bereit in verschiedenen Formen existieren [10, 11]. Diese haben gegenüber klassisch-optischen, Analogie- und quantenphysikalischen Realexperimenten den Vorteil, dass sie sich beliebig starten und stoppen lassen, und damit Interferenzverteilung Stück für Stück erkennbar machen, ohne, dass Zählraten interpretiert werden müssen.

4. Bisherige Erprobungen und Schlussfolgerungen aus dem Multiperspektiven Ansatz

Erst die Kombination aus qualitativen und quantitativen Methoden vervollständigt das Bild. Das zeigte sich sowohl in der Konzeptionsphase der Analogiemodelle als auch in nachfolgenden Fortbildungsveranstaltungen mit Lehrkräften. Allerdings bestand ein wesentlicher Unterschied in der Akzeptanz der Fachinhalte zwischen Schülerinnen und Schülern und ihren Lehrkräften:

Lehrkräften fiel es häufig schwer, sich im Rahmen von Weiterbildungsangeboten auf die konzeptionelle Herangehensweise der Wesenszüge an die Quantenphysik einzulassen. Viele waren es gewohnt, dass einen traditionellen, historischen Ansatz zu verfolgen, der sich hauptsächlich an Versuchen orientiert, wie

man heute eher der Atomphysik zuordnen würde (Compton-Effekt, Franck-Hertz, Spektralanalyse). Zusätzlich belastet die Lehrenden der Wechsel in der Aufgabekultur, weg von klassischen Rechenaufgaben, hin zu verständnisorientierten, vielleicht sogar ergebnisoffenen Aufgabenstellungen (Vgl. Operatoren: Interpretiere, Bewerte). Das hier vorgestellte Fortbildungskonzept und dessen methodische Ausrichtung versucht den Lehrkräften in diesem Sinne entgegenzukommen: Es knüpft an, an bereits bekannte Fachinhalte und zeigt, wie diese mit der „neuen“, konzeptionellen Quantenphysik verknüpft werden können, beispielsweise vom Fotoeffekt, über Koinzidenzmethode zum Nachweiseinzelner Photonen, hin zu den Wesenszügen. Gleichzeitig werden Aufgabentypen so gewählt, dass auch die so beliebten Rechenaufgaben einen Platz erhalten. Die Mathematisierung und Verknüpfung mit der Stochastik bietet oft die Gelegenheit, Methodenvielfalt einfließen zu lassen. Des Weiteren ist auch die Orientierung an schulpraktischen Experimenten und das Erarbeiten von anpassbaren Unterrichtsmaterialien eine Möglichkeit, Lehrkräfte für die neuen Lehrplaninhalte zu begeistern. Dabei hat sich gezeigt, dass Bauanleitungen für Do-It-Yourself- und Low-Cost-Experimente oft mehr Anklang finden als teure Laborexperimente. Nichtsdestotrotz werden auch alle Angebote geschätzt, die es Lehrkräften und ihren Schulklassen erlauben, die Materialien, die nicht schultauglich sind, hautnah im universitären Umfeld zu erfahren.

Die Schülerinnen und Schüler selbst, die sich nun dem „neuen“ Quantenphysikunterricht ausgesetzt sehen, begegneten den Inhalten oft mit weniger Skepsis als ihre Lehrenden. Sowohl im Schülerlabor als auch in zahlreichen Unterrichtsversuchen, konnten sie sich schnell auf die unterschiedlichen Herangehensweisen einlassen und Vorurteile, dass Quantenphysik etwas „Unbegreifliches“ sei, ablegen.

Zusammenfassen hat sich gezeigt, dass der Multiperspektive Ansatz, sowohl fachlich in der Verknüpfung von Wellen- und Quantenoptik als auch methodisch in der Kombination verschiedener experimenteller Perspektiven (klassisch-optische Versuche, Analogiemodelle, quantenphysikalische Realexperimente), den Lernenden unterschiedliche Wege bot, in das Thema einzusteigen. Die Erarbeitung verschiedener Blickwinkel, oft im Blended-Learning-Format, erlaubte es den Lernenden ihren eigenen Zugang zu wählen und so individuelle Lernfortschritte zu verzeichnen.

5. Literatur

- [1] Aehle, S.; Kappl, K.; Scheiger, P. (2025): Praxisorientiertes Fortbildungskonzept mit Selbstlerneinheiten zur Quantenphysik. In: PhyDid B, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung, 1 (2025)
- [2] Scheiger, P.; Kappl, K.; Aehle, S. (2025): Praxisorientiertes Fortbildungskonzept mit Selbstlerneinheiten zur Quantenphysik – Fokus auf Verschränkung und das quantenmechanische

Weltbild. In: PhyDid B, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung, 1 (2025)

- [3] Kappl, K.; Aehle, S.; Scheiger, P. (2025): Praxisorientiertes Fortbildungskonzept mit Selbstlerneinheiten zur Quantenphysik - Fokus auf dem Nachweis der Quantennatur des Lichts und der Erzeugung einzelner Photonen - In: PhyDid B, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung, 1 (2025)
- [4] Bildungsstandards im Fach Physik für die allgemeine Hochschulreife. Beschluss der Kultusministerkonferenz vom 18.06.2020: https://www.kmk.org/fileadmin/veroeffentlichungen_beschluesse/2020/2020_06_18-BildungsstandardsAHR_Physik.pdf (Stand: 4/2025)
- [5] Küblbeck, J.; Müller, R. (2002): Die Wesenszüge der Quantenphysik: Modelle, Bilder und Experimente. Aulis-Verlag Deubner & Co. KG, Köln
- [6] milq und die Wesenszüge der Quantenphysik. Url: <https://www.milq.info/milq-und-die-wesenszuege-der-quantenphysik/> (Stand: 4/2025)
- [7] Aehle, Stefan; Scheiger, Philipp; Cartarius, Holger (2022) An Approach to Quantum Physics Teaching through Analog Experiments. In: Physics (2022), Url: <https://www.mdpi.com/2624-8174/4/4/80> (Stand: 5/2025)
- [8] Aehle, S.; Cartarius, H.: Entwicklung von Analogie-Experimenten zum quantenmechanischen Messprozess. In: PhyDid B, Didaktik der Physik, Beiträge zur virtuellen DPG-Frühjahrstagung (2022), Grötzebauch, H. & Heinicke S. (Hrsg.), S.419-424.
- [9] Küblbeck, J. (2000): Der Quantenradierer: Ein einfaches Experiment mit Polarisationsfiltern am Doppelspalt für den Physikunterricht. In: Praxis der Naturwissenschaften Physik, Heft 8/49, Aulis Verlag Deubner & Co. KG, Köln; Lotze, K.-H. (Hrsg.)
- [10] Simulationsprogramm zum Mach-Zehnder-Interferometer der milq-Website, Universität Braunschweig, Url: <https://www.milq.info/MZ/index.html> (Stand 05/2025)
- [11] Simulationsprogramm zum Mach-Zehnder-Interferometer von MINTapps, Kippenberg, Url: <https://mintapps.org/html/mint-machzehnder.html> (Stand 05/2025)

Danksagung

Besonderer Dank gilt dem Stifterverband der deutschen Wissenschaft e.V. der im Rahmen der Quantum-Skills-Initiative das standortübergreifende Projekt der Lehrfortbildung durch seine QuBit-Fellowships für einen zeitgemäßen Quantenunterricht fördert.

Praxisorientiertes Fortbildungskonzept mit Selbstlerneinheiten zur Quantenphysik

- Fokus auf Verschränkung und das quantenmechanische Weltbild -

Philipp Scheiger*, Kim Kappl*, Stefan Ahle⁺

* Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 57, 70569 Stuttgart, ⁺Friedrich-Schiller-Universität Jena, August-Bebel-Straße 4, 07743 Jena
p.scheiger@physik.uni-stuttgart.de

Kurzfassung

In diesem Beitrag wird ein Fortbildungskonzept für Physiklehrkräfte vorgestellt, das sich speziell auf den Themenbereich „Verschränkung“ und das „quantenmechanische Weltbild“ fokussiert. Aufbauend auf bestehenden Blended-Learning-Strukturen wurde ein neues Modul konzipiert, das grundlegende Begriffe wie Realität, Lokalität, Kausalität und Determinismus im Licht der Quantenphysik adressiert. Der Beitrag beschreibt die inhaltliche Struktur der Selbstlerneinheiten, ihre didaktische Umsetzung sowie exemplarische Anwendungen im Unterricht. Erste Rückmeldungen zeigen, dass insbesondere die methodisch geführte Gegenüberstellung von klassischem und quantenmechanischem Weltbild zu einem vertieften Verständnis beiträgt.

1. Motivation

Mit der Einführung der KMK-Bildungsstandards (2020) [1] und ihrer landesspezifischen Umsetzung wurden das quantenmechanische Weltbild hinsichtlich der Begriffe Realität, Lokalität, Kausalität und Determinismus, sowie das Phänomen der Verschränkung fest in den Lehrplänen der Oberstufe verankert. Gleichzeitig zeigen Rückmeldungen aus Fortbildungen und Lehramtsausbildung, dass viele Lehrkräfte diese Konzepte als abstrakt und schwer vermittelbar empfinden. Besonders die Verschränkung ist schwer zu umreißen und häufig werden von Lernenden bei ersten Selbsterklärungen klassischen Konzepten wie „versteckte lokale Parameter“ als Hilfsmittel herangezogen, was jedoch im Widerspruch zur heutigen Physik steht.

Um diese Herausforderungen zu adressieren, wurde ein neues Fortbildungsmodul entwickelt, das sich explizit den Widersprüchen zwischen klassischem und quantenmechanischem Weltbild widmet. Neben den Begriffen der Realität, Lokalität, Kausalität und dem Determinismus behandelt dieser Kurs die Frage nach der Vollständigkeit von physikalischen Theorien, weil dies ein wesentlicher Diskussionspunkt in dem berühmten Paper von Einstein, Podolsky und Rosen [2] war, in dem das Phänomen der Verschränkung zur ersten Mal beschrieben wurde.

Zusätzlich wird in diesem Beitrag ein Vorschlag gemacht, wie dieses Thema in der Schule behandelt werden kann, sowie die prozessbezogene Bewertungskompetenz [3] digitaler Medien adaptiv anhand dieses Themas geübt werden kann. In diesem Beitrag wird zunächst das Fortbildungskonzept (Kapitel 2) vorgestellt, anschließend werden in Kapitel 3 Definitionen der relevanten Begriffe auf Schulniveau

gegeben und in Kapitel 4 wird ein Vorschlag für eine Unterrichtssequenz gegeben.

2. Das Fortbildungskonzept

Das Fortbildungskonzept folgt dem Blended-Learning-Ansatz mit Selbstlerneinheiten, Online-Sprechstunden und optionalen Präsenzveranstaltungen. Das Gesamtkonzept wird in einem weiteren Beitrag [4] vorgestellt. Hier steht der Kurs „Q4 – Verschränkung und das quantenmechanische Weltbild“ im Zentrum. Dieser gliedert sich in folgende Abschnitte:

- Q4.1: Das klassische Weltbild (Realität, Lokalität, Kausalität, Determinismus)
- Q4.2: Einführung in das quantenmechanische Weltbild
- Q4.3: Vertiefung: Warum versteckte lokale Parameter Verschränkung nicht erklären
- Online live: Didaktische Umsetzung – Vorschläge für den Unterricht

Die relevanten Begriffe für das quantenmechanische Weltbild werden mit neu formulierten Schuldefinitionen eingeführt und systematisch mit aktivierenden Übungen im Moodle-Kurs vertieft. Q4.3 behandelt keine direkt für die Schule relevanten Inhalte. Hier sollen am Beispiel eines Experimentvorschlags nach Hardy [5] versteckte lokale Parameter als Erklärung für das Phänomen der Verschränkung ausgeschlossen werden. Als Hintergrundwissen kann diese Thema für Lehrkräfte als relevant eingestuft werden.

3. Fachliche Klärung und Definitionen

Die für das quantenmechanische Weltbild relevanten Begriffe sollen in allgemeingültigen Definitionen für die Schule verständlich und anhand von Beispielen anschaulich gemacht werden. Da wir für die Schule noch keine ausführlichen Definitionen in der

Literatur gefunden haben, die diesem Anspruch gerecht werden, stellen wir hier unsere Vorschläge vor. Bei den vorgestellten Definitionen und Erklärungen handelt es sich um didaktische Reduktionen. Wir hoffen damit die Begriffe auch Schülerinnen und Schülern zugänglich zu machen. D.h. unsere Definitionen entsprechen nicht dem Stand der Wissenschaft und werden der fachlichen Tiefe, die sich teilweise hinter den Begriffen aufbaut, nicht vollumfänglich gerecht. Für einen fachlichen Überblick wird auf weiterführende Literatur (bspw. [6-7]) verwiesen. Dennoch sind diese Definitionen umfangreicher als einfache Beispiele und Spezialfälle.

Zunächst werden die Begriffe für das klassische Weltbild definiert und anschließend für die Quantenmechanik neu eingeordnet.

3.1. Das klassische Weltbild

Bevor das quantenmechanische Weltbild verstanden werden kann, bzw. dessen Besonderheiten deutlich gemacht werden können, muss Lernenden das klassische Weltbild hinsichtlich der Begriffe Realität, Lokalität, Kausalität und Determinismus präsent sein. Zusätzlich behandelt dieser Kurs die Frage nach der Vollständigkeit von physikalischen Theorien. Dies war der ursprüngliche Kritikpunkt von Einstein, Podolsky und Rosen in ihrem berühmten Paper zur Vollständigkeit der Quantenmechanik [2]. Die Autoren beschrieben zu ersten Mal das Phänomen der Verschränkung, um damit zu veranschaulichen, dass die Quantenmechanik aus ihrer Sicht noch nicht vollständig sei.

Unsere Vorschläge als Definitionen zu diesen Begriffen lauten:

3.1.1. Kausalität

Definition: „Das Prinzip der Kausalität besagt, dass Wechselwirkungen zweier physikalischer Systeme oder Ereignisse der strengen Abfolge von Ursache und Wirkung unterliegen. Aus der speziellen Relativitätstheorie ergibt sich, dass diese Wechselwirkung oder eine Informationsübertragung höchstens mit Lichtgeschwindigkeit passieren kann.“

Beispiel Lichtschalter:

Ein Lichtschalter wird betätigt und dadurch wird ein Stromkreis geschlossen (Ursache), an dem eine Lampe angeschlossen ist. Die Lampe leuchtet auf (Wirkung), allerdings nicht sofort sondern mit einer kurzen zeitlichen Verzögerung. Die Information über den geschlossenen Stromkreis (und damit auch die elektrische Energie) kann sich auch in der Leitung mit maximal Lichtgeschwindigkeit ausbreiten. D.h. es ergibt sich ein zeitlicher Abstand von mindestens $\Delta t = l/c$ zwischen dem Betätigen des Schalters und dem Aufleuchten der Lampe. Dabei ist c die Lichtgeschwindigkeit und l die Länge der Leitung vom Schalter zur Lampe.

3.1.2. Determinismus

Definition: „Nach dem Prinzip des Determinismus ist ein physikalisches Ereignis (z.B. das Ergebnis einer Messung) eindeutig vorherbestimmt, wenn die Ausgangssituation mit ausreichender Genauigkeit bekannt ist.“

Beispiel Newtonsche Mechanik:

Wenn wir von einer Masse m_1 den Ort $x(t)$ und ihre Geschwindigkeit $v(t)$ kennen, so können wir mit der Newtonschen Mechanik vorhersagen, wo sich die Masse zu jedem Zeitpunkt in Zukunft befinden wird.

3.1.3. Realität

Definition: „Die Natur oder physikalische Realität liegt aus der Perspektive der klassischen Physik unabhängig von der Beobachtung oder Messung vor. Mit immer besseren Messapparaturen kann die physikalische Realität immer genauer beobachtet und immer besser mit physikalischen Modellen beschrieben werden.“

Beispiel Mond:

Der Mond ist immer da, selbst wenn niemand hinschaut.

3.1.4. Lokalität

Definition: „Das Prinzip der Lokalität besagt, dass ein physikalisches System oder Ereignis ein Zweites nur beeinflussen kann, wenn eine physikalische Wechselwirkung zwischen beiden stattfinden kann. Für ein umfassendes Verständnis für die Lokalität muss die Relativitätstheorie und die darin formulierte Geschwindigkeitsgrenze der Lichtgeschwindigkeit in Vakuum, mit der Wechselwirkungen stattfinden, berücksichtigt werden.“

Beispiel unabhängiger Zerfall von Atomen:

Es finden zwei radioaktive Zerfälle von zwei Atomen zeitlich sehr eng nacheinander statt. Die Atome sind aber räumlich so weit von einander entfernt, dass die Information über den Zerfall des einen Atoms das zweite Atom vor dessen Zerfall nicht mehr erreichen kann, wenn diese Information mit maximal Lichtgeschwindigkeit unterwegs ist. Der Zerfall des einen Atoms kann den Zerfall des Zweiten somit nicht verursacht haben und beide Ergebnisse kommen unabhängig voneinander vor.

Beispiel Kernspaltung:

Beim Zerfall eines Uranatoms (^{235}U) werden Neutronen freigesetzt. Eines der Neutronen fliegt mit weniger als der Lichtgeschwindigkeit zu einem zweiten Uranatom, trifft dieses, was zur Spaltung führt. Hier verursacht der Zerfall des ersten Atoms den Zerfall des Zweiten. Dies ist aber nur möglich, weil das Neutron (als Information über den ersten Zerfall) mit einer kleineren Geschwindigkeit als der Lichtgeschwindigkeit das zweite Atom erreicht.

3.1.5. Vollständige Theorie

Definition: „Eine vollständige physikalische Theorie deckt jedes Element der physikalischen Realität ab. Wir kennen innerhalb dieser Theorie alles, was es zu Wissen gibt.“

3.2. Das quantenmechanische Weltbild

In diesem Abschnitt werden die Begriffe Realität, Lokalität, Kausalität und Determinismus aus der Sicht eines "quantenmechanischen" Weltbildes neu eingeordnet. Dafür wird zunächst die quantenmechanische Verschränkung definiert und es werden die Widersprüche hervorgehoben, die ein klassisches Weltbild und das Phänomen der Verschränkung erzeugen.

3.2.1. Die quantenmechanische Verschränkung

Definition: „Mehrere Quantenobjekte (oder -eigenschaften) können zusammen ein (kohärentes) System bilden, das durch eine gemeinsame Wellenfunktion beschrieben wird. Eine quantenmechanische Verschränkung liegt vor, wenn die Eigenschaften der einzelnen Teile des Systems nicht unabhängig voneinander vorliegen. D.h. eine Messung an einem Teil des Systems präpariert das Gesamtsystem so, dass durch das Messergebnis die Quanteneigenschaften der anderen Teile festgelegt werden.“

Verschränkung kann also nur auftreten, wenn wir Quantensysteme entsprechend kombinieren. Dies können komplementäre Eigenschaften eines Quantenobjekts sein (beispielsweise ist die Welcher-Weg-Information bei Interferometer-Experimenten verschränkt) oder die Kombination von mehreren Quantenobjekten. So ist es gängige Praxis an speziellen Kristallen aus einem Photon mit hoher Energie zwei Photonen mit niedrigerer Energie zu erzeugen, deren Polarisation verschränkt ist. Sind beispielsweise zwei Photonen in einem sogenannten „anti-korrelierten Bell-Zustand“ verschränkt und Photon 1 wird mit vertikaler Polarisation gemessen, so muss an Photon 2 eine horizontale Polarisation gemessen werden und umgekehrt. In diesem Beispiel können wir aber nie an beiden Photonen die gleiche Polarisation messen. Welche Polarisation an Photon 1 gemessen wird können wir wegen des **stochastischen Verhaltens** (Wesenszug der QM) der Quantenphysik nicht vorhersagen. Sobald die Polarisation eines Photons aber gemessen wurde, wissen wir automatisch auch alles über die Polarisation des zweiten. Ein verschränkter Zustand ist dabei eine komplette Beschreibung des kombinierten Quantensystems. Es existieren keine weiteren Informationen über das System.

3.2.2. Kausalität

Wechselwirkungen zweier physikalischer Systeme oder Ereignisse unterliegen weiterhin der strengen Abfolge von Ursache und Wirkung. Die Wahl des experimentellen Aufbaus (Ursache) hat Auswirkungen auf das Ergebnis (Wirkung) des Experiments. So hat z.B. die Wahl der Spaltbreite Auswirkungen auf das Ergebnis des Doppelspaltexperiments. Die

Ausnahme bildet der Messprozess, hier kann nach der Wahrscheinlichkeitsbestimmung keine Ursache angegeben werden, warum genau dieser eine Zustand und kein anderer (aber nach der Wahrscheinlichkeit möglicher) Zustand gemessen wurde.

3.2.3. Determinismus

Auch die Quantenmechanik hat viele deterministische Aspekte und das quantenmechanische Verständnis des Determinismus bleibt bis auf eine Ausnahme gleich wie in der klassischen Weltsicht. So können wir über die Schrödinger-Gleichung vieles im Voraus berechnen, Messbereiche eingrenzen und die einzelnen Messergebnisse sind eindeutig (Wesenszug der QM). Die Ausnahme bildet das stochastische Verhalten, welche Ergebnisse konkret gemessen werden, als zentraler Wesenszug der Quantenphysik. Der Zufall hinter dieser Wahrscheinlichkeitsaussage schränkt den Determinismus, wie die Kausalität, in der Quantenphysik ein. D.h. der quantenmechanische Determinismus bezieht sich nicht auf den exakten Wert, der für eine Messung vorhergesagt werden kann, sondern gibt für jeden möglichen Messwert eine Wahrscheinlichkeit, diesen zu messen.

3.2.4. Realität

Die Natur oder physikalische Realität existiert auch in der Quantenphysik. In der Quantenphysik hat die Messung aber einen Einfluss auf die Natur oder Realität. Vor und nach einer Messung können unterschiedliche Zustände, z.B. unterschiedliche Polarisationsrichtungen, vorliegen. Mehrere Möglichkeiten tragen gemeinsam zu einer neuen Realität bei, wie die Fähigkeit zur Interferenz zeigt. So können zwei unterschiedliche Eigenschaften (z.B. horizontale und vertikale Polarisation eines Photons oder die Weg-Information im Interferometer) gleichzeitig vorliegen (Fähigkeit zur Interferenz) aber nie gleichzeitig gemessen werden (Eindeutigkeit der Messergebnisse).

3.2.5. Lokalität

Das Phänomen der Verschränkung ist der Grund, warum die Quantenmechanik heute als „nicht-lokale“ Theorie bezeichnet wird. Die Messung an einem Quantenobjekt in einem verschränkten Zustand hat unmittelbar und damit mit Überlichtgeschwindigkeit Einfluss auf die Messung des verschränkten Partners. Wir können dieses Phänomen aber nicht nutzen, um Informationen oder Nachrichten mit Überlichtgeschwindigkeit zu verschicken, weil wir die konkreten Messergebnisse nicht bewusst manipulieren können (aufgrund des statistischen Verhalten und damit des absoluten Zufalls in der Quantenphysik).

3.2.6. Vollständige Theorie

Gäbe es z.B. versteckte lokale Parameter, die die Messergebnisse an verschränkten Quantenobjekten vorherbestimmen und die die Physik noch nicht kennt, wäre die Quantenphysik keine vollständige Theorie. Dies war eine zentrale Forderung von Einstein, Podolsky und Rosen in ihrem berühmten

Artikel aus dem Jahr 1935 [2]. Spätere Theorien und Experimente (für die 2022 der Nobelpreis in Physik verliehen wurde) haben die Existenz von solchen Parametern aber widerlegt [8-12]. Die Quantenmechanik ist in sich eine vollständige Theorie und kann nicht durch lokale Parameter verbessert werden.

3.3. Zusammenfassung

Das klassische Weltbild geht davon aus, dass physikalische Eigenschaften unabhängig von Beobachtung existieren (Realität), kausale Zusammenhänge mit endlicher Geschwindigkeit ablaufen (Lokalität), Ereignisse vorherbestimmt sind (Determinismus) und eine vollständige Theorie alle Eigenschaften der Natur beschreibt.

Demgegenüber steht das quantenmechanische Weltbild, das z.B. durch verschränkte Photonenpaare die Begriffe Realität und Lokalität fundamental infrage stellt. Verschränkung bedeutet, dass zwei Quantenobjekte (oder -eigenschaften) so miteinander verbunden sind, dass eine Messung an einem Objekt sofort den Zustand des anderen festlegt – unabhängig von der Entfernung. Dabei zeigt sich, dass die Quantenmechanik eine „nicht-lokale“ Theorie ist und darüber hinaus keine versteckten lokalen Variablen benötigt – sie ist in sich vollständig.

4. Unterrichtsvorschlag

Um Lehrkräften didaktisch tragfähige Umsetzungen für den eigenen Unterricht bereitzustellen, wurde ein konkreter, siebenteiliger Unterrichtsvorschlag entwickelt, der sowohl fachliche als auch prozessbezogene Kompetenzen fördert. Konkret soll im Anschluss an den inhaltlichen Input die Bewertungskompetenz von digitalen Medien geübt werden. Aktivierende und interaktive Übungsphasen mit Hilfe der Peer-Instruction [13] ermöglichen den Lehrkräften die spätere Übungsphase adaptiv zu gestalten und damit an die Leistungen der SchülerInnen anzupassen.

4.1. Phase 1: Input/Selbststudium – Einführung in das klassische Weltbild

Ziel: Aktivierung des Vorwissens sowie Klärung zentraler Begriffe wie Realität, Lokalität, Kausalität und Determinismus im Sinne der klassischen Physik. Die Schülerinnen und Schüler erhalten Definitionen und einfache alltagsnahe Beispiele, die das klassische Verständnis dieser Begriffe veranschaulichen. Diese Phase legt die konzeptuelle Grundlage, zu der später das quantenmechanische Weltbild gegenübergestellt werden kann.

4.2. Phase 2: Übungsphase – Peer Instruction zu klassischen Konzepten

Ziel: Tiefere Begriffsverankerung und erste Anwendung durch konzeptuelle Fragen.

Mithilfe des Peer-Instruction-Ansatzes (nach Eric Mazur [13]) diskutieren die SchülerInnen gezielte Verständnisfragen, die sich um die vorher eingeführten Begriffe des Weltbildes drehen. So wird

erkennbar, ob die klassischen Konzepte wirklich verstanden wurden, bzw. die SchülerInnen unterstützen sich gegenseitig bei Verständnisschwierigkeiten.

4.3. Phase 3: Input/Selbststudium – Die quantenmechanische Verschränkung

Ziel: Aufbau eines Verständnisses um das Phänomen der Verschränkung.

Die Lernenden erhalten eine Einführung in verschränkte Quantenzustände. Die Schülerdefinitionen werden in verständlicher Sprache eingebunden und durch grafische Beispiele (z. B. Polarisationszustände) ergänzt.

4.4. Phase 4: Übungsphase – Peer Instruction zur Verschränkung

Ziel: Überprüfung und Verankerung des neuen Wissens.

Auch hier kommen konzeptuelle Fragen zum Einsatz, diesmal mit Fokus auf „Korrelationsmessungen“ oder typische Missverständnisse wie „Informationsübertragung mit Überlichtgeschwindigkeit“.

4.5. Phase 5: Gruppenarbeit – „Mimic Einstein“ Widersprüche herausarbeiten

Ziel: Vergleich beider Weltbilder und Identifikation von Spannungsfeldern.

In dieser Phase analysieren die SchülerInnen in Gruppenarbeit, wo genau die quantenmechanischen Konzepte den klassischen Vorstellungen widersprechen. Dies geschieht z. B. anhand der Frage: „Was hat Einstein an dieser Theorie gestört?“ Aufgabe ist es die klassischen Definitionen für die Quantenmechanik anzupassen.

4.6. Phase 6: Ergebnissicherung – Konsequenzen für das Weltbild

Ziel: Zusammenfassung der Erkenntnisse und bewusste Reflexion der Konsequenzen.

In dieser Phase formulieren die Lernenden, wie sich ihr physikalisches Weltbild verändert hat. Begriffe wie Realität und Determinismus werden neu eingeordnet. Diese Reflexion kann schriftlich oder in moderierten Plenumsdiskussionen erfolgen und kann als Grundlage für eine Leistungsbewertung dienen. Wichtig ist hier auch die Betonung, dass Quantenphysik nicht im Widerspruch zur Realität steht, sondern eine neue Sichtweise auf sie anbietet.

4.7. Phase 7: Adaptive Übungsphase – Kritischer Umgang mit Quellen und Quanten-Behauptungen

Ziel: Förderung digitaler Recherche- und Bewertungskompetenzen.

In dieser abschließenden Phase arbeiten die SchülerInnen mit populärwissenschaftlichen und pseudo-wissenschaftlichen Quellen (z. B. zum Thema „Quantenheilung“ und Teleportation) und wenden ihre fachlichen Kenntnisse an, um die Inhalte und ihre

Aufbereitung kritisch zu bewerten. Diese Übung stärkt die Fähigkeit zur Differenzierung zwischen wissenschaftlicher Evidenz, spekulativer Interpretation und falschen Behauptungen – eine Schlüsselkompetenz in einer zunehmend digitalisierten Welt.

5. Zusammenfassung

Das vorgestellte Fortbildungskonzept stellt einen praxisnahen Ansatz dar, um Lehrkräfte beim Vermitteln grundlegender Konzepte der Quantenphysik zu unterstützen – insbesondere beim Vergleich des klassischen Weltbildes mit einem modernen quantenmechanischen Weltbildes. Durch die Verbindung von Selbstlernphasen mit interaktiven Elementen, sowie neuen und für die Schule didaktisch reduzierten Definitionen zentraler Begriffe wie Realität, Lokalität, Kausalität und Determinismus, gelingt es dem Kurs, ein oft als abstrakt empfundenes Thema greifbar zu machen.

Das Phänomen der Verschränkung nimmt bei der Herausarbeitung der Unterschiede zwischen dem klassischen und dem quantenmechanischen Weltbild eine zentrale Rolle ein. Als Vertiefung und für das Hintergrundwissen der Lehrkräfte werden außerdem versteckte lokale Parameter als Erklärung für die Verschränkung ausgeschlossen.

Ein siebenteiliger Unterrichtsvorschlag überträgt die Inhalte zudem in konkrete schulische Praxis und fördert neben Fachkompetenzen auch kritisch-reflexive Fähigkeiten im Umgang mit digitalen Medien und populärwissenschaftlichen Aussagen.

6. Literatur

- [1] Bildungsstandards im Fach Physik für die allgemeine Hochschulreife. Beschluss der Kultusministerkonferenz vom 18.06.2020: https://www.kmk.org/fileadmin/veroeffentlichungen_beschluesse/2020/2020_06_18-BildungsstandardsAHR_Physik.pdf (Stand: 4/2025)
- [2] Einstein, Albert; Podolsky, Boris and Rosen, Nathan (1935): Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? In: *Physical Review*, 47 (10), S. 777–780
- [3] Ministerium für Kultus, Jugend und Sport Baden-Württemberg (2016) Bildungsplan des Gymnasiums: Physik. Url: https://www.bildungsplaene-bw.de/site/bildungsplan/get/documents/lbw/export-pdf/depot-pdf/ALLG/BP2016BW_ALLG_GYM_PH.pdf (Stand 05/2025)
- [4] Aehle, Stefan; Kappl, Kim; Scheiger, Philipp (2025): Praxisorientiertes Fortbildungskonzept mit Selbstlerneinheiten zur Quantenphysik. In: *PhyDid B*, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung, 1 (2025)
- [5] Hardy, Lucien (1993): Nonlocality for two particles without inequalities for almost all entangled states. In: *Physical Review Letter*, 71 (11), S. 1665–1668
- [6] Lambare, Justo Pastor (2022): On the Meaning of Local Realism. In: *Foundations of Physics*, 52 (5), S. 98.1-98.15.
- [7] Sheldon Goldstein et al. Bell’s theorem. *Scholarpedia*, 6(10):8378 (2011) url: http://www.scholarpedia.org/article/Bell%27s_theorem (Stand 05/2025)
- [8] Clauser, John et al. (1969): Proposed Experiment to Test Local Hidden-Variable Theories. In: *Physical Review Letter*, 23 (15), S. 880–884
- [9] Freedman, Stuart and Caluser, John (1972): Experimental Test of Local Hidden-Variable Theories. In: *Physical Review Letter*, 28 (14), S. 938–941
- [10] Aspect, Alain et al. (1981): Experimental Tests of Realistic Local Theories via Bell’s Theorem. In: *Physical Review Letter*, 47 (7), S. 460–463
- [11] Aspect, Alain et al. (1982): Experimental Realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm Gedankenexperiment: A New Violation of Bell’s Inequalities. In: *Physical Review Letter*, 49 (2), S. 91–94
- [12] Aspect, Alain et al. (1982): Experimental Test of Bell’s Inequalities Using Time-Varying Analyzers. In: *Physical Review Letter*, 49 (25), S. 1804–1807
- [13] Mazur, Eric (2017): *Peer Instruction*: Springer Berlin, Heidelberg

Danksagung

Die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen des Verbundprojekts „Professionelle Netzwerke zur Förderung adaptiver, prozessbezogener, digital gestützter Innovationen in der MINT Lehrpersonenbildung (MINT-ProNed)“ von Bund und Ländern aus Mitteln des Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) im Projekt „lernen:digital“ (Förderkennzeichen 01JA23M02L) unterstützt.

Wissenschaftsverständnis von Physiker:innen – Zwei Fallbeispiele aus einer Lehrkräftefortbildung –

Linda Zwick, Rita Wodzinski

Universität Kassel, Didaktik der Physik, Heinrich-Plett-Str. 40, 34132 Kassel
linda.zwick@uni-kassel.de

Kurzfassung

Im Kasseler SFB ELCH (Sonderforschungsbereich Extremes Licht für die Analyse und Kontrolle von molekularer Chiralität) ist ein Transferprojekt eingebunden, das sich die Förderung des Wissenschaftsverständnisses von Lehrkräften zum Ziel gesetzt hat. Dabei werden drei zentrale Aspekte von Nature of Science (NOS) besonders berücksichtigt: (1) die Erkenntnisgewinnung in naturwissenschaftlicher Forschung, (2) das Zusammenspiel von Theorie und Experiment in der Physik und (3) die Zusammenarbeit und Kollaboration unter Physiker:innen.

An der letzten Lehrkräftefortbildung im Projekt waren eine Theoretische Physikerin und ein Experimentalphysiker aktiv beteiligt. Neben dem Präsentieren von Einblicken in ihre jeweilige Forschung tauschten sie sich mit an der Fortbildung teilnehmenden Lehrkräften und untereinander aus. Im Beitrag wird rekonstruiert, wie sich das Wissenschaftsverständnis der beiden Physiker:innen im Verlauf der Fortbildung entwickelt. Die Ergebnisse zeigen, dass Lehrkräfte-Fortbildungen zu NOS auch für Forschende eine Gelegenheit bieten, ihre fachliche Praxis zu reflektieren und in didaktische Kontexte zu überführen.

1. Motivation

Wie denken Physiker:innen über ihre eigene Disziplin nach? Was können sie für ihr eigenes Wissenschaftsverständnis gewinnen, wenn sie an einer Physiklehrkräftefortbildung zu Nature of Science (NOS) mitwirken? In Zwick und Wodzinski (2024) haben wir das Forschungsvorhaben zu NOS-Vorstellungen von Physiklehrkräften sowie das Konzept einer entsprechenden Fortbildung vorgestellt. Im Zuge der Auswertung der letzten Fortbildung zeigte sich, dass nicht nur bei den teilnehmenden Physiklehrkräften, sondern auch bei den mitwirkenden Physiker:innen interessante Entwicklungen im Wissenschaftsverständnis auftraten.

Im Folgenden geben wir Einblicke in das Wissenschaftsverständnis einer Theoretischen Physikerin und eines Experimentalphysikers sowie dessen Veränderung im Verlauf einer Fortbildung, an der beide am 18. Juni 2024 an der Universität Kassel teilgenommen haben. Die Vorstellungen von Physiker:innen über ihre eigene Disziplin ist aus physikdidaktischer Perspektive relevant, da ihre Vorstellungen und Auffassungen die universitäre Lehre und damit auch die Ausbildung zukünftiger Physiker:innen und Physiklehrkräfte und auf diesem Wege auch die von Schüler:innen beeinflussen (Schwartz & Lederman, 2008). Zudem können die Vorstellungen von Fachwissenschaftler:innen ein Korrektiv für fachdidaktische Perspektiven auf NOS darstellen. Eine weitere Motivation stellt die grundsätzliche Frage dar, inwieweit Fachwissenschaftler:innen von der Zusammenarbeit mit der Fachdidaktik auch inhaltlich profitieren.

2. Forschungsstand und theoretischer Rahmen

Bereits seit den 1980er Jahren befassen sich empirische Studien mit den Vorstellungen von Lehrenden und Wissenschaftler:innen über Naturwissenschaften und wissenschaftliche Praxis. Dabei zeigen sich unterschiedliche Sichtweisen auf NOS, also auf grundlegende Charakteristika von Wissenschaft – etwa deren epistemologische Prinzipien oder naturwissenschaftlichen Denk- und Arbeitsweisen. Rowell und Cawthron (1982) konnten zeigen, dass sich Wissenschaftsverständnisse disziplinär unterscheiden: Naturwissenschaftliches universitäres Personal tendierte in ihrer Studie eher zu einem falsifikationistischen Wissenschaftsbild nach Popper, während Lehrende anderer Fachbereiche andere Akzente setzten. Pomeroy (1993) unterschied wie Rowell und Cawthron in ihrer Studie zwischen „traditionellen“ Vorstellungen – etwa Objektivität, Faktensammlung, Empirismus – und „nicht-traditionellen“ Vorstellungen, die Aspekte wie Intuition, kulturelle Bedingtheit oder die Historie wissenschaftlicher Erkenntnis einbeziehen. Eine ihrer zentralen Hypothesen lautete, dass sich mit wachsender Sozialisation in der naturwissenschaftlichen Forschung eher traditionelle Konzepte verfestigen. Spätere Studien wie die von Schwartz (2012) zeichnen ein differenzierteres Bild. Wissenschaftler:innen äußern demnach kontextbezogene Vorstellungen von Wissenschaft, die sich nicht allein durch disziplinäre Zugehörigkeit erklären lassen, sondern wesentlich durch individuelle Erfahrungen und ihre jeweilige Forschungsgemeinschaft geprägt sind. Schwartz betont dabei, dass eine

systematische Auseinandersetzung mit der eigenen Forschung erforderlich sei, um zu verstehen, wie Wissenschaftler:innen über Wissenschaft denken. Dies erfordert einen bewussten Perspektivwechsel: weg vom praktischen Forschen hin zur Reflexion über den Prozess der Erkenntnisgewinnung und die Bedingungen, unter denen wissenschaftliches Wissen entsteht – also über die Rolle theoretischer Modelle, des Forschungsgruppenalltags und methodischer Vorgehensweisen (vgl. Schwartz & Crawford, 2004). Solche metakognitiven Prozesse sind im Forschungsalltag eher selten (Elby & Hammer, 2001), können aber gerade im Kontext von Lehrer:innenbildung und Wissenschaftskommunikation eine zentrale Bedeutung gewinnen.

Um diese Reflexionsprozesse analytisch einzuordnen, wird in diesem Beitrag eine begriffliche Differenzierung vorgenommen: Unter NOS werden fachdidaktisch entwickelte Konzepte zum Wesen von Naturwissenschaften verstanden. Wissenschaftsverständnis hingegen meint das individuelle Verständnis von Wissenschaft, wie es von Einzelpersonen – hier Physiker:innen – im jeweiligen Kontext geäußert wird.

3. Fortbildungskontext

Das Thema NOS mit Blick auf den Physikunterricht war Gegenstand einer ganztägigen Fortbildung an der Universität Kassel am 18. Juni 2024. Ziel der Fortbildung war es, zentrale Aspekte naturwissenschaftlicher Erkenntnisgewinnung sowie Formen der Zusammenarbeit in der physikalischen Forschung – insbesondere im Zusammenspiel von theoretischer und experimenteller Physik – zu beleuchten und anknüpfend an vorliegende didaktische Zugänge Unterrichtsmaterialien für den Physikunterricht zur Bearbeitung dieser Themen zu entwickeln.

An der Veranstaltung nahmen zwei Physiklehrkräfte, zwei Examensabsolventen des Physik-Lehramtsstudiums sowie zwei Physiker:innen teil. Diese wurden aktiv in das Fortbildungsprogramm eingebunden und gewährten zudem den anderen Teilnehmenden unmittelbare Einblicke in ihre Forschungsarbeiten. Mit einer kurzen Präsentation und einer Laborführung stellten sie ihre jeweiligen Arbeitsweisen, Arbeitsorte, Herausforderungen und kooperativen Prozesse im Forschungsalltag vor.

Inhaltlich setzte sich die Fortbildung aus mehreren aufeinander abgestimmten Modulen zusammen, bei denen die Physiker:innen unterschiedliche Rollen und Aufgaben übernommen haben (s. Abbildung 1).

4. Forschungsfragen und -daten

Ziel des Beitrags ist es, das Wissenschaftsverständnis der teilnehmenden Physiker:innen – einer theoretischen Physikerin und eines Experimentalphysikers – im Rahmen ihrer Mitwirkung an einer Physiklehrkräftefortbildung zu Nature of Science (NOS) zu rekonstruieren und dessen Entwicklung im Verlauf der

Veranstaltung nachzuvollziehen. Im Mittelpunkt stehen dabei die folgenden Forschungsfragen:

- (LF1) Wie denken Physiker:innen über ihre eigene Disziplin nach?
 (LF2) Was können sie für ihr eigenes Wissenschaftsverständnis gewinnen, wenn sie an einer Physiklehrkräftefortbildung zu NOS mitwirken?

Zur Beantwortung dieser Fragen werden folgende Daten herangezogen: (a) Einzelinterviews mit der theoretischen Physikerin und dem Experimentalphysiker, die vor und nach der Fortbildung durchgeführt wurden (Pre- und Post-Interviews) und (b) Concept Maps, die im Verlauf der Fortbildung in mehreren Phasen gemeinsam und einzeln erstellt und weiterentwickelt wurden. Darüber hinaus existieren (c) Videomitschnitte der Concept Mapping-Arbeitsphasen sowie der Präsentationen und Diskussionen der finalen Concept Maps sowie (d) ergänzend: Beobachtungsprotokolle der Fortbildungsleitung und Videoaufzeichnungen interaktiver Elemente (z. B. Gruppenarbeiten zur Unterrichtsvideogestaltung). Die Daten (a) und (b) sind zentral, da diese bereits vertiefte Einblicke in die individuellen Vorstellungen der Physiker:innen und in deren Entwicklung im Rahmen des Fortbildungsprozesses ermöglichen. Die Auswertung erfolgt rekonstruktiv und vergleichend entlang der beiden Leitfragen.



Abb. 1: Ablauf der Fortbildung. Darstellung verschiedener Module sowie Rollen der Beteiligten: Die theoretische Physikerin (pink) und der Experimentalphysiker (grau) gestalteten die Laborführung und die Projektpräsentation. In den weiteren Phasen arbeiteten sie gemeinsam mit den anderen Teilnehmenden (blau). Eigene Darstellung.

5. Vorstellung der Fallbeispiele

Nachfolgend werden die beiden an der Fortbildung mitwirkenden Physiker:innen fallweise porträtiert. Zur besseren Lesbarkeit werden die beiden Physiker:innen mit sprechenden Pseudonymen bezeichnet: Thea (für die Theoretische Physikerin) und Emil (für den Experimentalphysiker).

5.1. Thea (Theoretische Physikerin)

Thea ist eine promovierte Theoretische Physikerin mit mehrjähriger Erfahrung in Forschung und Lehre. Nach dem Abitur an einem Gymnasium in Baden-Württemberg studierte sie Physik an einer Universität in Baden-Württemberg (Bachelor of Science) und arbeitete währenddessen als studentische Hilfskraft sowohl an der Universität als auch an einem Fraunhofer-Institut. Ihr Masterstudium absolvierte sie an einer norddeutschen Universität. In dieser Zeit engagierte sie sich als Nachhilfelehrerin und Kursleiterin in Mathematik; zudem besuchte sie eine Lehrveranstaltung zur Wissenschaftsphilosophie (»Philosophy of Science«). Anschließend sammelte sie weitere berufliche Erfahrungen in Vollzeitstellung an einem Fraunhofer-Institut. Parallel dazu wirkte sie in Outreach-Projekten der norddeutschen Universität für Schüler:innen mit. Ihre Promotion schloss sie im Bereich Theoretische Physik ab. Nach der Promotion wechselte sie als Post-Doc nach Kassel.

5.2. Emil (Experimentalphysiker)

Emil ist Promotionsstudent in der Experimentalphysik und befindet sich in der Abschlussphase. Nach dem Abitur an einem bayrischen Gymnasium begann er sein Physikstudium (Bachelor of Science) an einer Universität in Thüringen. Während des Bachelorstudiums belegte er aus persönlichem Interesse eine Philosophievorlesung zum Thema „Wahrheit“. Nach dem Abschluss sammelte er erste Berufserfahrungen im Rahmen eines Auslandspraktikums in einem solartechnischen Betrieb in Spanien. Anschließend setzte er sein Studium an der Universität Kassel im Masterstudiengang Physik fort und begann dort im Anschluss auch seine Promotion.

6. Auswertung der Fallbeispiele

Für die Auswertung der Fallbeispiele werden aus den Einzelinterviews mit den Physiker:innen Antworten auf folgende ausgewählte Fragen vorgestellt:

- (1) Was zeichnet deiner Meinung nach naturwissenschaftliche Denk- und Arbeitsweisen aus?
- (2) Was charakterisiert deiner Meinung nach die Experimentalphysik und die Theoretische Physik jeweils?
- (3) Wie würdest du das Verhältnis von Experimentalphysik und Theoretischer Physik beschreiben?

Zudem werden Concept Maps (eine erarbeitete Concept Map in Einzelarbeit zu Beginn des Fortbildungstages und gemeinsame Entwicklung einer

Concept Map beider Physiker:innen über den Fortbildungstag hinweg) ausgewertet.

Der Fokus der Frage (1) liegt auf den naturwissenschaftlichen Denk- und Arbeitsweisen, die im Rahmen von NOS im engen Bezug zur Erkenntnisgewinnung stehen.

Die zweite und dritte Fragestellung nehmen die Charakteristika der physikalischen Arbeitsbereiche von Thea und Emil sowie die Zusammenarbeit beider Bereiche in den Blick.

Die Concept Maps geben einen Gesamtüberblick über die strukturellen Zusammenhänge des Wissenschaftsverständnisses von Thea und Emil zur „Physik als Naturwissenschaft“.

6.1. Wissenschaftsverständnis von Thea: Pre, Post im Vergleich

Im Folgenden wird das in den Pre- und Post-Interviews geäußerte Wissenschaftsverständnis der theoretischen Physikerin Thea zu den oben genannten Aspekten und Fragen gegenübergestellt.

6.1.1. Zu (1) Naturwissenschaftliche Denk- und Arbeitsweisen

Im Pre-Interview betont Thea zunächst die erkenntnistheoretische Dimension naturwissenschaftlicher Erkenntnisgewinnung. Ausgangspunkt ihrer Überlegungen ist dabei der Wunsch der Naturwissenschaft, „Fakten zu schaffen“, wobei sie zugleich einschränkt: „Fakten sind halt irgendwie aber auch subjektiv.“ (Pre, ZM 19). Aus dieser Spannung heraus richtet sie den Fokus auf die grundlegende Frage, wie Wissen überhaupt entsteht. Sie reflektiert, dass exaktes Wissen über die reale Welt prinzipiell nicht möglich sei. Vielmehr sei es ein gradueller Prozess, bei dem Beobachtungen so lange und so oft wiederholt und geprüft würden, bis sie als relativ sichere Fakten gelten. Damit rückt sie die Vorläufigkeit und Unsicherheit wissenschaftlicher Aussagen in den Vordergrund und beschreibt Naturwissenschaft als an intersubjektiver Bestätigung orientierten, epistemisch vorsichtigen Prozess.

Im Post-Interview zeigt sich eine Ausdifferenzierung und Konkretisierung des Verständnisses naturwissenschaftlicher Denk- und Arbeitsweisen. Ausgangspunkt ihrer Beschreibung bleibt ein faktenbasiertes, auf Objektivität ausgerichtetes Wissenschaftsverständnis. Hierbei betont sie nun methodische Prinzipien wie Sorgfalt, Skepsis, vorsichtiges Vorgehen und systematische Recherche als wesentliche Elemente wissenschaftlicher Praxis. Bezüglich naturwissenschaftlicher Denkweisen hebt sie Logik und Kreativität besonders hervor. Bezüglich letzterem sagt sie: „[...] kamen wir dann auch noch drauf, dass Inspiration natürlich auch wichtig ist für die Theorie. Das hat uns schon sehr angesprochen, dass Kreativität eben auch wichtig ist.“ (Post, ZM 44).

Auffallend ist zudem ihre explizite Thematisierung des strukturierten Aufbaus von Wissen innerhalb der

Disziplin Physik. Als pragmatisches Ziel naturwissenschaftlicher Arbeitsweisen formuliert sie schließlich, „zur Problemlösung zu kommen, ohne viel Aufwand zu betreiben“.

6.1.2. Zu (2) und (3) Charakterisierung von Experimentalphysik und Theoretischer Physik sowie dessen Verhältnis zueinander

Im Pre-Interview beschreibt Thea, dass sie die starke institutionelle Aufteilung zwischen Experimentalphysik und Theoretischer Physik an deutschen Universitäten als besonders auffällig empfindet. Sie hat diese bereits im Studium wahrgenommen. Sie schildert, dass sie die Vermittlung von Inhalten in der Experimentalphysik als ein „Unterrichten von oben herab“ erlebt hat. Im Vordergrund standen dabei Fragen wie: „Was gibt es eigentlich alles? Und warum machen wir das?“ Im Gegensatz dazu habe sie die Vorlesungen in Theoretischer Physik so erlebt, dass man sich dort Zeit nahm, „die Sachen mal herzuleiten und nichts vom Himmel fällt.“

Mit zunehmender Forschungserfahrung hat sich ihr Bild der Experimentalphysik und Theoretischen Physik deutlich verändert. Bereits im Pre-Interview betont sie die wechselseitige Abhängigkeit beider Bereiche: „Ein Theoretiker kann niemals alleine was Echtes forschen.“ (Pre, ZM 53). Theoretiker:innen seien darauf angewiesen, dass empirische Daten und experimentelle Validierung ihre Modelle stützen. Umgekehrt verweist sie auf die Herausforderungen im experimentellen Alltag: Experimentator:innen hätten oft wenig Zeit oder keine angemessene Ausbildung, um sich selbst vertieft mit theoretischen Fragestellungen zu ihren experimentellen Forschungsbereichen auseinanderzusetzen. Sie formuliert pointiert: „Theoretiker BRAUCHEN die Experimentalos.“ (Pre, ZM 59).

Im Post-Interview entwickelt die Physikerin dieses Verständnis weiter. Sie kritisiert die institutionelle Trennung nun explizit als „sehr künstlich“ und reflektiert, dass diese sich historisch und strukturell verfestigt habe („Also die ist von oben herab gegeben worden - schon sehr früh, auch im Deutschen“). In der Forschungspraxis dagegen ergebe diese Trennung wenig Sinn, da Experimente auf theoretischen Konzepten basieren und ihre Interpretation ohne Theorie nicht möglich sei: „Die Experimente basieren auf den Theorien [...] und die Interpretation der Ergebnisse funktioniert nur mit der Theorie.“ (Post, ZM 23).

Darüber hinaus beschreibt sie die unterschiedlichen „Arbeitslogiken“ beider Bereiche. Experimentator:innen könnten die reale Komplexität physikalischer Systeme nicht ignorieren und benötigten daher ein solides Verständnis der relevanten theoretischen Zusammenhänge. Theoretiker:innen hingegen könnten sich im Modellierungsprozess bewusster Vereinfachungen bedienen („[...] während der Theoretiker das einfach postuliert“), was ihnen ermöglicht, komplexe Probleme rechnerisch zu bearbeiten, aber auch Grenzen in der praktischen Anwendbarkeit mit sich

bringe. Sie fasst dies zusammen als „ganz andere Arbeitsrealität“ beider Gruppen: „Der eine hat die Probleme und kommt nicht drum herum, und der andere kann sich alle Probleme wegdenken, kommt dann aber nicht sehr weit.“ (Post, ZM 25).

Insgesamt wird deutlich, dass die Physikerin im Verlauf der Fortbildung und mit wachsender Forschungserfahrung ein zunehmend differenziertes Verständnis der Charakteristika und wechselseitigen Bezüge von Experimental- und Theoretischer Physik entwickelt. Dabei verschiebt sich ihr Blick von einer zunächst strukturell vermittelten Differenzierung hin zu einer funktional und kognitiv integrierten Betrachtung beider Forschungsbereiche.

6.2. Concept Map von Thea

Theas Concept Map (vgl. Abbildung 2) spiegelt ein deutlich prozessorientiertes Verständnis von Physik als Naturwissenschaft wider. Theorie und Experiment werden in der Map als wechselseitig aufeinander angewiesene und miteinander kooperierende Bereiche dargestellt. Beide Felder sind dabei gleichermaßen auf Erkenntnisgewinnung ausgerichtet, die als zentrales Ziel physikalischen Arbeitens erscheint.

Naturwissenschaftliche Denk- und naturwissenschaftliche Arbeitsweisen werden als konstitutive Bestandteile der Physik positioniert. Besonders betont Thea die Rolle von Zusammenarbeit im wissenschaftlichen Prozess: Erkenntnisgewinn ist in ihrer Darstellung untrennbar mit Kooperation zwischen Theorie und Experiment sowie mit kommunikativen Praktiken innerhalb der Fachgemeinschaft verbunden. In

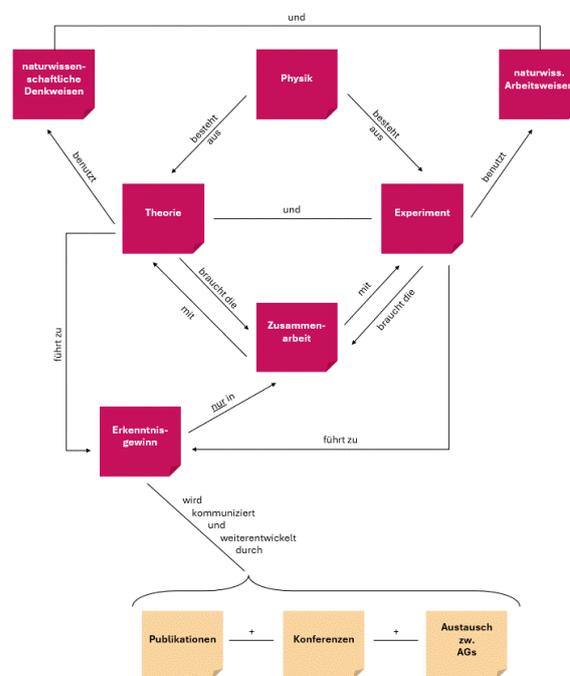


Abb. 2: Concept Map zum Thema „Physik als Naturwissenschaft“ der theoretischen Physikerin Thea zu Beginn des Fortbildungstages. Eigene Darstellung.

der Map wird explizit auf die Bedeutung von Publikationen, Konferenzen und dem Austausch zwischen Arbeitsgruppen für die Weiterentwicklung und Validierung wissenschaftlicher Erkenntnisse hingewiesen.

Insgesamt zeigt sich in der Map ein relationales und kollektiv orientiertes Wissenschaftsverständnis, das die Interdependenz der beiden physikalischen Teilbereiche sowie die soziale Dimension naturwissenschaftlichen Arbeitens klar hervorhebt.

6.3. Wissenschaftsverständnis von Emil: Pre, Post im Vergleich

Im Folgenden wird das in den Pre- und Post-Interviews geäußerte Wissenschaftsverständnis des Experimentalphysikers gegenübergestellt.

6.3.1. Zu (1) Naturwissenschaftliche Denk- und Arbeitsweisen

Im Pre-Interview beschreibt Emil naturwissenschaftliche Denk- und Arbeitsweisen als einen Prozess der Überprüfung von Hypothesen in einem Rückkopplungssystem. Zentral ist für ihn dabei das Prinzip, eine These nicht nur theoretisch aufzustellen, sondern sie durch ein Experiment aktiv zu testen: „[...] diese Rückkopplung, dass man nicht nur eine These aufstellt und in die Welt schiebt, sondern halt (...) auch testet, ob es funktioniert.“ (Pre, ZM 19). Modellbildung und das gezielte Infragestellen von Erwartungen spielen dabei eine zentrale Rolle. Als Quelle wissenschaftlicher Erkenntnis benennt er ausdrücklich nicht die Bestätigung, sondern vielmehr das Scheitern von Erwartungen: „Eigentlich, wirkliche Erkenntnis gibt es nur, wenn nicht das passiert, was man erwartet.“ (Pre, ZM 22).

Im Post-Interview präzisiert und erweitert Emil diese Perspektive. Er spricht nun explizit von einer „Rückkopplungsschleife“ zwischen Modellbildung auf der theoretischen Seite und der experimentellen Validierung auf der praktischen Seite (Post, ZM 22). Neben der Modellbildung selbst rücken Überprüfung, Diskussionen zur Konsensfindung und komplexe Theorieentwicklung stärker in den Vordergrund. Zudem betont er die Bedeutung kollektiver wissenschaftlicher Praxis: Erkenntnisse entstehen im Zusammenspiel mit anderen – sowohl mit Theoretiker:innen als auch mit weiteren Experimentalphysiker:innen. Wissenschaftliches Arbeiten erscheint damit nicht nur als zyklischer Erkenntnisprozess, sondern zunehmend auch als kooperativer Aushandlungsprozess.

6.3.2. Zu (2) und (3) Charakterisierung von Experimentalphysik und Theoretischer Physik sowie dessen Verhältnis zueinander

Im Pre-Interview betont Emil bereits deutlich seine Skepsis gegenüber einer strikten Trennung von Experimentalphysik und Theoretischer Physik. Er beschreibt, dass beide Bereiche eng zusammenarbeiten und Simulationen als gemeinsames Werkzeug zur gegenseitigen Bestätigung und Ergänzung ihrer

Überlegungen nutzen. Diese wechselseitige Bezugnahme wird durch ein pragmatisches Verständnis der jeweiligen Arbeitsweisen ergänzt: Während er Experimentalphysik als aktives „Ausprobieren im Labor“ (Pre, ZM 90) beschreibt, versteht er Theoretische Physik als konzeptionelles Arbeiten am Schreibtisch oder Computer, bei dem neue Ideen entwickelt und systematisch durchdacht werden.

Im Post-Interview vertieft Emil diese Sichtweise und rückt stärker die Gemeinsamkeiten der beiden Bereiche in den Vordergrund. Er beschreibt Kreativität als verbindendes Element beider Felder – sowohl im Entwickeln neuer Ideen als auch im Finden geeigneter experimenteller Umsetzungen. Dabei verweist er explizit auf unterschiedliche Werkzeuge, die je nach Herangehensweise eingesetzt werden: Während in der Experimentalphysik intuitive Zugänge und praktisches Ausprobieren dominieren, liegt der Schwerpunkt der Theoretischen Physik stärker auf mathematischer Modellierung und rechnerischer Analyse. Simulationen bleiben als gemeinsames methodisches Bindeglied zwischen beiden Bereichen zentral.

Darüber hinaus formuliert Emil im Post-Interview das Verhältnis von Experimental- und Theoretischer Physik explizit als wechselseitige Bedingung und Abhängigkeit. Beide Bereiche stützen und inspirieren sich gegenseitig und tragen gemeinsam zum Erkenntnisprozess bei. Damit entwickelt sich im Verlauf der Fortbildung sein Verständnis von einer zunächst pragmatisch-kooperativen Sichtweise hin zu einer expliziten Betonung der funktionalen Integration beider Felder.

6.4. Concept Map von Emil

Emils Concept Map (vgl. Abbildung 3), die zu Beginn der Fortbildung in Einzelarbeit erstellt wurde, zeigt ein strukturiertes Verständnis physikalischer Wissenschaft mit einem deutlichen Fokus auf die Zusammenarbeit zwischen Theorie und Experiment und

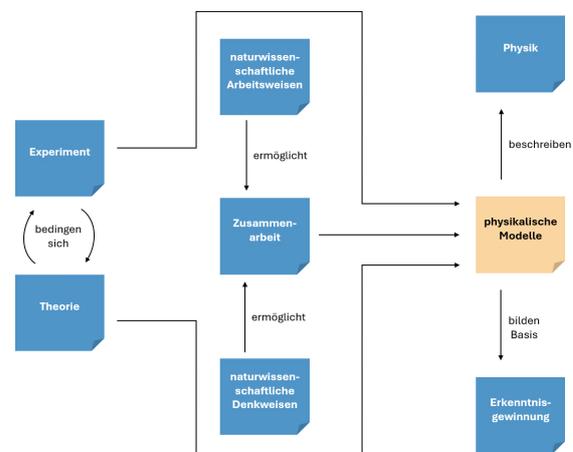


Abb. 3: Concept Map zum Thema „Physik als Naturwissenschaft“ des Experimentalphysikers Emil zu Beginn des Fortbildungstages. Eigene Darstellung.

die Rolle physikalischer Modelle. Im Zentrum der Darstellung steht die Idee, dass physikalische Modelle einerseits durch Experimente überprüft und andererseits durch Theorie inspiriert werden. Modelle übernehmen dabei die Funktion, physikalische Zusammenhänge zu beschreiben und als Basis für Erkenntnisgewinnung zu dienen.

Naturwissenschaftliche Denk- und Arbeitsweisen werden als grundlegende Voraussetzungen für physikalisches Arbeiten benannt. Theorie und Experiment sind in der Map als voneinander abhängige, sich bedingende Bereiche dargestellt, deren Kooperation über den Knoten "Zusammenarbeit" explizit hervorgehoben wird. Erkenntnisgewinnung wird klar an diese Zusammenarbeit geknüpft. Physikalische Phänomene werden in dieser Map nicht explizit als eigener Begriff aufgeführt.

6.5. Gemeinsame Concept Map von Thea und Emil

Nach der Auswertung der Einzelinterviews und Concept Maps beider Physiker:innen bietet die gemeinsam entwickelte Concept Map (vgl. Abbildung 4) einen Einblick in ein geteiltes, abgestimmtes Verständnis von Physik als Naturwissenschaft, das in der Zusammenarbeit während der Fortbildung entstanden ist. Die gemeinsame Map wurde im Anschluss an die individuelle Concept-Mapping-Phase kooperativ erstellt und über den Fortbildungstag hinweg nach jedem Block überarbeitet und ergänzt. Diese Concept Map bildet die Perspektiven beider Physiker:innen in strukturierter Form ab. Sie kann daher als verdichtetes und wechselseitig abgestimmtes Ergebnis eines disziplininternen Aushandlungsprozesses über zentrale Begriffe naturwissenschaftlicher Praxis gelesen werden.

Im Zentrum der Map stehen physikalische Modelle und physikalische Phänomene, die als gleichberechtigte, eng miteinander verbundene Elemente des physikalischen Erkenntnisprozesses dargestellt werden. Physikalische Modelle beschreiben Phänomene, geben ihnen Wert und werden ihrerseits durch Experimente überprüft und validiert. Physikalische Phänomene wiederum liefern die empirische Grundlage für die Entwicklung und Überprüfung von Modellen. Zwischen beiden besteht ein wechselseitiges, dynamisches Verhältnis. Die Zusammenarbeit zwischen Theorie und Experiment wird als notwendige Bedingung für physikalische Erkenntnisgewinnung hervorgehoben – betont durch den eingefügten Zusatz „NUR in [Zusammenarbeit]“. Theorie und Experiment werden dabei als unterschiedliche, aber aufeinander angewiesene Zugänge zur wissenschaftlichen Erkenntnis verstanden. Naturwissenschaftliche Denkweisen und naturwissenschaftliche Arbeitsweisen sind jeweils getrennt aufgeführt, werden aber beiden Bereichen zugeordnet und gelten als Voraussetzung physikalischen Arbeitens.

Im Vergleich zu den individuellen Concept Maps zeigt die gemeinsam entwickelte Map eine deutlich

erweiterte und stärker integrierte Darstellung zentraler Elemente physikalischer Wissenschaft. In der Map von Emil wurden physikalische Modelle bereits als zentrales Element im Zusammenspiel von Theorie und Experiment dargestellt. In der Map von Thea hingegen spielten Modelle keine explizite Rolle; dort standen die Kooperation zwischen Theorie und Experiment sowie die soziale Dimension wissenschaftlicher Erkenntnisgewinnung im Vordergrund.

Der explizite Knoten „Physikalische Phänomene“, der in der gemeinsamen Map gleichwertig neben die Modelle gestellt wurde, war in beiden Einzel-Maps nicht vorhanden und stellt ein im Kooperationsprozess gemeinsam ergänztes Element dar. Die Bedeutung von Zusammenarbeit zwischen Theorie und Experiment als Voraussetzung für Erkenntnisgewinnung war in beiden Einzel-Maps stark betont und wurde in der gemeinsamen Map nochmals prägnant herausgestellt („NUR in Zusammenarbeit“). Naturwissenschaftliche Denk- und Arbeitsweisen waren in beiden Einzel-Maps enthalten; in der gemeinsamen Map wurden sie systematischer integriert und beiden Bereichen explizit zugeordnet. Während die Concept Map von Thea zusätzlich die soziale Dimension wissenschaftlicher Erkenntnisentwicklung (Publikationen, Konferenzen, Austausch zwischen Arbeitsgruppen) besonders hervorhob, wird diese explizite Ebene in der gemeinsamen Map nicht in gleicher Weise dargestellt. Dafür wird in der gemeinsamen Map die wechselseitige Beziehung von physikalischen Phänomenen und Modellen sowie die Rolle von Experiment und Theorie im Prozess der Modellbildung und Validierung klar ausgearbeitet.

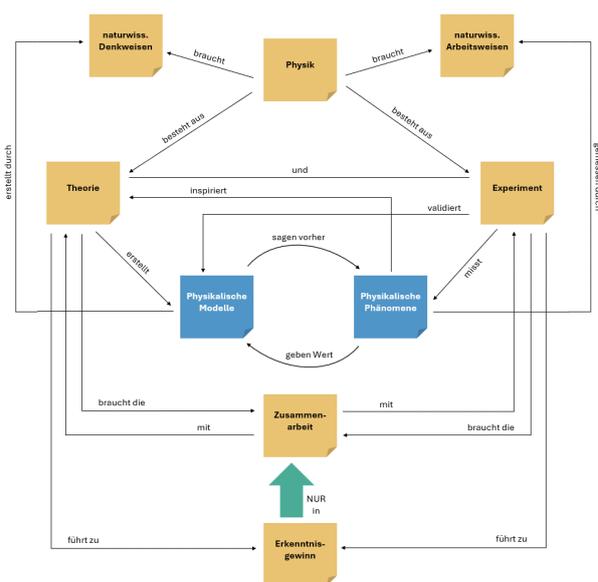


Abb. 4: Gemeinsam erarbeitete Concept Map von der theoretischen Physikerin Thea und dem Experimentalphysiker Emil. Eigene Darstellung.

6.6. Vergleichende Betrachtung: Gemeinsame und unterschiedliche Entwicklungen von Thea und Emil

Die Fallbeispiele zeigen, dass sich das im Verlauf der Fortbildung geäußerte Wissenschaftsverständnis der beiden Physiker:innen in wesentlichen Aspekten angenähert und zugleich in bestimmten Bereichen spezifisch weiterentwickelt hat. Die vergleichende Betrachtung erlaubt es, sowohl gemeinsame Entwicklungslinien als auch unterschiedliche Akzentuierungen der individuellen Perspektiven sichtbar zu machen.

Ein zentrales gemeinsames Element beider Physiker:innen ist das Verständnis von Theorie und Experiment als wechselseitig abhängige und kooperierende Bereiche physikalischer Forschung. Bereits in den Pre-Interviews wurde dieser Zusammenhang betont und in den Post-Interviews sowie in der gemeinsam erarbeiteten Concept Map weiter präzisiert. Besonders deutlich wurde dies im gemeinsamen Verständnis der Zusammenarbeit als notwendige Voraussetzung für Erkenntnisgewinnung, wie es in der finalen Concept Map explizit formuliert wurde.

Unterschiedlich ausgeprägt war in den individuellen Concept Maps zunächst die Berücksichtigung epistemischer Werkzeuge und sozialer Dimensionen wissenschaftlicher Praxis. Während Thea in ihrer Map die soziale Dimension wissenschaftlicher Erkenntnisentwicklung (z.B. durch Publikationen, Konferenzen und Austausch zwischen Arbeitsgruppen) notierte, lag der Fokus von Emil stärker auf der Rolle physikalischer Modelle im Zusammenspiel von Theorie und Experiment. In der gemeinsamen Concept Map wurde interessanterweise der Fokus von Emil partiell in Theas Map integriert: Die Rolle von Modellen und physikalischen Phänomenen wurde gemeinsam ins Zentrum gestellt, während die explizite Darstellung der sozialen Dimension in der finalen Map zurücktrat. In den Videografien der Concept Mapping Phasen wird jedoch ersichtlich, dass Emil Thea in ihrer Perspektive mündlich zustimmt.

In beiden Fallbeispielen zeichnet sich eine zunehmende Differenzierung und Strukturierung im Verständnis naturwissenschaftlicher Denk- und Arbeitsweisen ab. Die oberflächlichen Ansätze aus den Beschreibungen in den Pre-Interviews werden in den Post-Interviews zu strukturierten Aussagen mit einer Reihe an Beispielen zur Untermauerung der Verständnisse.

Insgesamt lassen sich sowohl eine Annäherung der Perspektiven als auch wechselseitige Erweiterungen feststellen. Während zentrale Grundannahmen wie die Notwendigkeit von Kooperation und die Bedeutung epistemischer Werkzeuge von beiden Physiker:innen geteilt und gemeinsam ausformuliert wurden, blieben einzelne Schwerpunktsetzungen (z. B. soziale Dimensionen, Modellorientierung bei Emil) in unterschiedlichem Maße präsent.

7. Ergebnisse zu LF1 und LF2

Die beiden Fallbeispiele zeigen exemplarisch, wie Physiker:innen über ausgewählte Aspekte naturwissenschaftlicher Praxis nachdenken und welche Impulse eine explizite Auseinandersetzung mit Nature of Science (NOS) dabei setzen kann.

7.1. Zu LF1: Wie denken Physiker:innen über ihre eigene Disziplin nach?

Die Analysen zeigen, dass beide Physiker:innen zu Beginn der Fortbildung bereits ein deutlich prozessorientiertes und relationales Verständnis von Physik als Naturwissenschaft aufwiesen. Theorie und Experiment wurden von beiden als wechselseitig abhängige und kooperierende Bereiche verstanden. Das Wissen um die Notwendigkeit von Zusammenarbeit war dabei bereits Teil ihres professionellen Selbstverständnisses als Forschende. Allerdings unterschieden sich die individuellen Schwerpunktsetzungen in der expliziten Reflexion über wissenschaftliche Praxis: Während die theoretische Physikerin Thea, erkenntnistheoretische Denkmuster, die soziale Dimension von Wissenschaft und die Rolle kommunikativer Praktiken besonders betonte, lag der Fokus des Experimentalphysikers Emil stärker auf der epistemischen Funktion von Modellen und dem iterativen Charakter des Erkenntnisprozesses.

Insgesamt zeigt sich, dass die betrachteten Physiker:innen differenziert über ihre eigene Disziplin nachdenken und zentrale epistemische, methodische und soziale Aspekte ihrer Arbeit reflektieren — allerdings mit individuellen Akzentuierungen, die aus ihrer jeweiligen Forschungspraxis und disziplinären Verortung resultieren. Diese Beobachtung deckt sich mit den eingangs skizzierten Ergebnissen von Schwartz (2012).

7.2. Zu LF2: Was können Physiker:innen für ihr eigenes Wissenschaftsverständnis gewinnen, wenn sie an einer Physiklehrkräftefortbildung zu Nature of Science (NOS) mitwirken?

Die Fortbildung bot den Physiker:innen die Gelegenheit, ihr implizites Wissenschaftsverständnis explizit zu machen und im kollegialen Austausch miteinander abzugleichen und in neue Kontexte (z.B. Physikunterricht, Vermittlung von NOS) zu überführen. Dieser Prozess förderte bei beiden eine systematischere und breiter angelegte Reflexion über ihre eigene Praxis. Dies zeigte sich insbesondere in der Entwicklung und Diskussion der gemeinsamen Concept Map, in der zuvor nicht explizit genannte oder differenziert betrachtete Elemente (z.B. physikalische Phänomene als eigenständiger Bezugspunkt, bewusste Zuordnung von Denk- und Arbeitsweisen) sichtbar wurden. Beide Physiker:innen explizierten so ihr Verständnis physikalischer Wissenschaft um strukturelle und epistemologische Perspektiven, die über ihre jeweilige disziplinäre Alltagslogik präziser in den Vordergrund rückten.

Darüber hinaus wurde deutlich, dass die

Auseinandersetzung mit NOS-Inhalten eine vertiefte Sensibilität für die Vermittlungsperspektive eröffnete. Beide Physiker:innen begannen im Verlauf der Fortbildung zu reflektieren, welche Aspekte ihrer Wissenschaftspraxis im Unterricht sinnvoll thematisierbar sind und wie Wissenschaft im schulischen Kontext angemessen repräsentiert werden kann.

8. Fazit und Ausblick

Die vorliegenden Fallbeispiele verdeutlichen, dass Physiker:innen in der Mitwirkung an einer NOS-orientierten Lehrkräftefortbildung nicht nur ihr eigenes Wissenschaftsverständnis explizieren, sondern dieses auch um neue Perspektiven erweitern. Gleichzeitig zeigen die Ergebnisse, dass solche Reflexionsprozesse individuell unterschiedlich verlaufen und stark von disziplinärer Sozialisation und forschungspraktischen Erfahrungen geprägt sind.

Daraus ergeben sich mehrere Desiderate für die weitere Forschung: Erstens bedarf es einer systematischeren Untersuchung, wie unterschiedliche disziplinäre Hintergründe und Rollenbilder (z.B. innerhalb verschiedener Fachbereiche oder Karrierestufen) das Wissenschaftsverständnis von Physiker:innen prägen und welche spezifischen Lernpotenziale sich daraus für Fortbildungsformate ergeben. Zweitens wäre es lohnenswert, die Nachhaltigkeit solcher Reflexionsprozesse genauer zu erfassen: In welchem Maße verändert sich das explizite und implizite Wissenschaftsverständnis von Physiker:innen langfristig durch die Teilnahme an NOS-Fortbildungen/-Seminaren und inwiefern schlägt sich dies in ihrem eigenen Lehr- und Kommunikationsverhalten nieder? Drittens sollten künftige Studien verstärkt die dialogische Dimension solcher Formate in den Blick nehmen: Wie entwickelt sich das Wissenschaftsverständnis in der Interaktion von Physiker:innen und Lehrkräften? Welche wechselseitigen Lernprozesse entstehen in diesem Austausch?

Darüber hinaus legen die Befunde nahe, dass es sinnvoll ist, Fortbildungsformate stärker dialogisch und reflexiv auszurichten und Physiker:innen gezielt als Partner:innen in der schulischen Wissenschaftsvermittlung einzubinden. Hier eröffnen sich sowohl für die fachdidaktische Forschung als auch für die Gestaltung von Fortbildungsprogrammen vielversprechende Ansatzpunkte für eine vertiefte Zusammenarbeit zwischen universitärer Forschung und schulischer Praxis.

9. Literatur

- Elby, A., & Hammer, D. (2001). On the substance of a sophisticated epistemology. In *Science Education*, 85(5), 554–567.
- Pomeroy, D. (1993). Implications of Teacher's Beliefs about the Nature of Science: Comparison of the Beliefs of Scientists, Secondary Science Teachers, and Elementary Teachers. In *Science Education*, Vol. 77 (3), 261-278.

- Rowell, J. A. & Cawthron, E. R. (1982). Images of Science: an Empirical Study. In *EJSE*, Vol. 4 (1), 79-94.
- Schwartz, R. (2012). The Nature of Scientists' Nature of Science Views. In M. S. Khine (Hrsg.), *Advances in Nature of Science Research* (153-188). Dordrecht: Springer.
- Schwartz, R. S. & Crawford, B. (2004). Authentic scientific inquiry as a context for teaching nature of science: Identifying critical elements for success. In L. Flick & N. Lederman (Hrsg.), *Scientific inquiry and nature of science: Implications for teaching, learning, and teacher education* (331–356). Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic.
- Schwartz, R. & Lederman, N. (2008). What Scientists' views of nature of science and relation to science context. In *IJSE*, Vol. 30 (6), 727-771.
- Zwick, L. & Wodzinski, R. (2024). NOS im Fokus: Forschung zu Vorstellungen von Physiklehrkräften. In H. Grötzebauch, & S. Heinicke (Hrsg.), *PhyDid B, Didaktik der Physik, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung Greifswald 2024* (119-123).

Analoges Problemlösen auf dem Prüfstand: Reproduzierbarkeit und neue Erkenntnisse

Marco Seiter*, Heiko Krabbe*

*AG Didaktik der Physik, Ruhr-Universität Bochum, Universitätsstr. 150, 44801 Bochum

Marco.seiter@rub.de

Kurzfassung

Die Auseinandersetzung mit Socioscientific Issues erfordert häufig, dass SchülerInnen ihr wissenschaftliches Wissen in unbekanntem und unsicheren Kontexten anwenden. Problemlösen durch Analogietransfer (Analogical Problem Solving) kann dabei helfen, vorhandenes Wissen auf neue Situationen anzuwenden. Problemlösen durch Analogietransfer nutzt Analogien oder Metaphern, um ein neues Problem durch Parallelen zu einem zuvor gelösten Problem zu lösen (Gick & Holyoak, 1983; Schmid, 2006). Diese Art des Transfers konzentriert sich auf strukturelle Ähnlichkeiten zwischen Problemen und nicht auf vergleichbare Oberflächenmerkmale (Schmid, 2006). Studien (siehe Gray & Holyoak, 2021) zeigen, dass ProbandInnen, die eine Geschichte mit einer spezifischen Lösungsstrategie lesen, diese Strategie häufiger auf eine analoge Problemgeschichte anwenden. Eine erste Replikation der Ergebnisse von Gick & Holyoak (1980) im Zusammenhang mit naturwissenschaftlicher Bildung durch Seiter & Krabbe (2024) bestätigte diese Ergebnisse nicht. Um die abweichenden Ergebnisse besser analysieren zu können wurden weitere Erhebungen durchgeführt. Der Beitrag liefert neue Erkenntnisse sowie methodische Überlegungen und diskutiert Implikationen für zukünftige Forschung.

1. Einleitung

Die Auseinandersetzung mit Socioscientific Issues (SSI) wie dem Klimawandel stellt Lernende vor die Herausforderung, wissenschaftliches Wissen auf neuartige, komplexe und oft unsichere Kontexte zu übertragen. Solche Situationen lassen sich nicht durch reines Faktenwissen bewältigen, sondern erfordern eine flexible, kontextabhängige Anwendung von Vorwissen also eine Kompetenz, die im Konzept des Analogietransfers zentral verankert ist. Problemlösen durch Analogietransfer ermöglicht es Lernenden, Strukturen aus bekannten Problemsituationen (Ausgangsproblem) auf neue, noch unbekannte Szenarien (Zielproblem) zu übertragen (Vendetti et al., 2015).

Ein zentraler Bezugspunkt für das Forschungsfeld des Analogietransfers stellt die vielzitierte Studie von Gick und Holyoak (1980) dar, die mit 4307 Zitaten auf Google Scholar und 1361 auf Web of Science (Stand: 07.05.2025) nicht nur in der Psychologie, sondern auch im Bereich der Science Education rezipiert wird. Die Studie mit insgesamt fünf Experimenten wurde mit Psychologiestudierenden und in späteren Phasen mit bezahlten Versuchspersonen durchgeführt und bildet den Ausgangspunkt für zahlreiche Untersuchungen zum Analogietransfer (Gray & Holyoak, 2021). Ihre Ergebnisse wurden vielfach auf andere Fachgebiete und insbesondere auch auf das Lernen von SchülerInnen übertragen.

Ein erster Adaptionsversuch mit einem selbst entwickelten Ziel- bzw. Ausgangsproblem inkl. mehrere Lösungsstrategien (s. Tab. 1) und einer Stichprobe von 40 Erwachsenen und 37 SchülerInnen durch

Seiter & Krabbe (2024) konnte die Ergebnisse der Originalstudie jedoch nicht bestätigen. Ziel des vorliegenden Beitrags war daher eine Wiederholung der Studie von Seiter & Krabbe (2024) mit einer größeren Stichprobe an SchülerInnen sowie eine Replikation des ersten Experiments aus der Originalstudie von Gick & Holyoak (1980) ebenfalls mit SchülerInnen. Ergänzt wurde das Studiendesign durch die Einbindung von zwei weiteren Ausgangsproblemen aus der Arbeit von Holyoak & Koh (1983), da in dieser Studie das gleiche Zielproblem wie bei Gick & Holyoak (1980) verwendet wurde. Die verwendete Lösungsstrategie der Aufteilung stimmt ebenfalls überein, wobei sich aber jeweils die Transferdistanz zwischen Ausgangs- und Zielproblem unterscheidet. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die replizierten Studien.

Tab. 1: Überblick über die replizierten Studien

Studie	Zielproblem	Ausgangsproblem	Lösungsstrategien
Gick & Holyoak (1980)	Tumorbehandlung	Eroberung einer Festung	Aufteilung, offener Zugang, Tunnel
Holyoak & Koh (1983)	Tumorbehandlung	Glühbirnenreparatur	Aufteilung (zwei Transferdistanzen)
Seiter & Krabbe (2024)	Energieversorgung	Geldschmuggel	Umwandlung, neue Route, Aufteilung

Der vorliegende Beitrag zielt somit auf die Reproduzierbarkeit bisheriger Ergebnisse ab, liefert aber auch

einen empirisch Beitrag zum besseren Verständnis von Problemlösen durch Analogietransfer.

2. Theoretische Grundlage

Problemlösen durch Analogietransfer bezeichnet die Verwendung von Analogien oder Metaphern, um eine neue Problemstellung in Analogie zu einem bereits gelösten Problem zu bewältigen. (Gick & Holyoak, 1983; Schmid, 2006). Im Zentrum dieses Prozesses stehen nicht die Ähnlichkeiten in den Oberflächenmerkmale, sondern die Übereinstimmungen in den zugrunde liegenden strukturellen und kausalen Beziehungen der Problemsituationen. Jede erkannte strukturelle Ähnlichkeit erlaubt es, eine Regel oder eine Schlussfolgerung über solche Zusammenhänge zu formulieren (Schmid, 2006). Durch die wiederholte Anwendung dieser Regeln oder Inferenzprozesse wird eine abstrakte Repräsentation gebildet, die als sogenannte „Makrostruktur“ beschrieben werden kann (Kintsch & Van Dijk, 1978). Diese Makrostruktur umfasst übergeordnete Lösungsschemata oder generelle Problemlösungsstrategien, die auch auf andere Situationen übertragbar sind. Der Prozess des Problemlösens durch Analogietransfer lässt sich in mehrere aufeinanderfolgende Phasen gliedern (siehe Abbildung 1). Zunächst ist es erforderlich, einen Zugriff (Access) vom Zielproblem (Target) zum Ausgangsproblem (Source) herzustellen. Ist dieser Zugriff gegeben, erfolgt eine Zuordnung (Mapping), in der strukturelle Entsprechungen zwischen Source und Target identifiziert werden. Auf dieser Basis erfolgt schließlich eine Folgerung (Inference), mit deren Hilfe sich Lösungsmöglichkeiten für das Zielproblem ableiten lassen. Dieser gesamte Prozess führt (als Lernprozess) zu einem übergeordnetem Schema, das zukünftige Problemlösungen erleichtert.

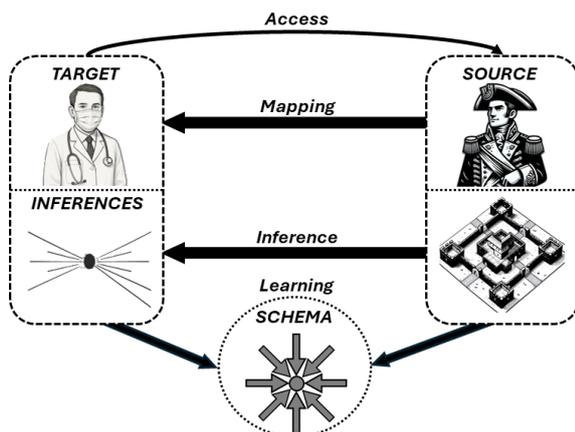


Abb. 1: Prozess des Schema-Lernens während Analogical Transfer (vgl. Gray & Holyoak, 2021)

3. Literatur Review

Studien legen nahe, dass ProbandInnen, die eine Geschichte mit einer bestimmten Lösungsstrategie lesen, diese Strategie mit höherer Wahrscheinlichkeit anwenden, wenn sie mit einem analogen Problem konfrontiert werden (Gick & Holyoak, 1980, 1983;

Holyoak, Junn & Billman, 1984; Brown, Kane & Echols, 1986; Catrambone & Holyoak, 1987, 1989; Holyoak & Koh, 1987). Die Ergebnisse legen nahe, dass die Konfrontation mit einer bestimmten Strategie im Ausgangsproblem deren Anwendung auf ein neues, analoges Problem erleichtern kann.

Für einen erfolgreichen Analogietransfer ist es entscheidend, strukturelle Verbindungen zwischen den Zielperspektiven der Geschichten herzustellen. Eine oberflächliche Ähnlichkeit reicht dafür nicht aus (Brown, Kane & Echols, 1986; Catrambone & Holyoak, 1989). Dies unterstreicht die Bedeutung tiefgehender struktureller Gemeinsamkeiten für die erfolgreiche Übertragung von Problemlösungen.

Die Nähe der Analogie, in diesem Fall definiert als die Anzahl der analog formulierten Satzbausteine, zwischen Ausgangs- und Zielproblem beeinflusst die Effektivität des Analogietransfers maßgeblich. Je näher sich Ausgangs- und Zielproblem sind, desto stärker fällt der Transfereffekt aus (Gick & Holyoak, 1980; Holyoak & Koh, 1987). Dies verdeutlicht, wie wichtig die Auswahl von Analogien mit tiefgreifenden strukturellen Übereinstimmungen ist.

4. Forschungsfrage und Hypothesen

Die Forschungsfrage in diesem Beitrag lautet:

FF: Inwiefern beeinflusst eine vorgegebenen Problemsituation inkl. Lösung mit einer bestimmten Strategie das Lösungsverhalten von ProbandInnen in einer analogen Problemsituation?

Aus dem bisherigem Stand der Forschung lassen sich drei Hypothesen ableiten:

ProbandInnen, die mit einer Problemsituation konfrontiert werden, welche eine spezifische Lösungsstrategie beinhaltet, werden mit höherer Wahrscheinlichkeit ...

- im Vergleich zu alternativen Lösungsstrategien (H1),
- im Vergleich zu ProbandInnen aus Experimentalgruppen mit anderen Lösungsstrategien und den Kontrollgruppen (H2),
- im Vergleich zu ProbandInnen anderer Experimentalgruppe mit gleicher Lösungsstrategie aber höhere Transferdistanz (H3),

... eine Lösung auf Basis dieser Strategie vorschlagen, wenn sie mit einem analogen Problem konfrontiert werden.

5. Methodik

5.1. Design

Die Datenerhebung erfolgte im Gegensatz zur Studie von Gick & Holyoak (1980) nicht mittels Interviews mit lautem Denken, sondern in Form von schriftlichen Testheften.

Die ProbandInnen wurden randomisiert auf die Experimental- und Kontrollgruppen verteilt. Die Experimentalgruppen unterschieden sich in den

verschiedenen Ausgangs- und Zielproblemen sowie in den vorgegeben Lösungsstrategie (siehe Tabelle 1). In den Experimentalgruppen sollte zunächst das Ausgangsproblem inklusive der Lösungsstrategie gelesen und schriftlich zusammengefasst werden. Anschließend wurde das Zielproblem gestellt und die ProbandInnen dazu aufgefordert, schriftlich möglichst viele Lösungen zu generieren. Es wurde dabei explizit der Hinweis gegeben, das Ausgangsproblem mit der vorgegeben Lösungsstrategie als Hilfsmittel zu verwenden. In den Kontrollgruppen sollte direkt das Zielproblem gelöst werden.

Zum Abschluss wurden die ProbandInnen noch gefragt, ob Ihnen das Zielproblem bereits bekannt war (ja, teilweise & nein) und zusätzlich in den Experimentalgruppen auf einer dreistufigen Likert-Skala wie hilfreich (sehr hilfreich, etwas hilfreich, nicht hilfreich) sie das Ausgangsproblem zur Lösung des Zielproblem fand.

5.2. Ausgangs- und Zielprobleme

5.2.1. Gick & Holyoak (1980) sowie Holyoak & Koh (1987)

Zur Reproduktion des Forschungsstands wurden in dieser Studie im ersten Teil die gleichen Ausgangs- und Zielprobleme wie in dem ersten Experiment von Gick & Holyoak (1980) und der Studie von Holyoak & Koh (1987) verwendet. Die Probleme wurden übersetzt und so formuliert, dass Ausgangs- und Zielprobleme den gleichen Textumfang mit möglichst analogen Formulierungen aufwiesen.

Das Zielproblem der Tumorbehandlung, das sowohl in der Studie von Gick & Holyoak (1980) als auch in der von Holyoak & Koh (1987) identisch verwendet wurde, lautete:

„Ein Tumor befindet sich im Inneren des Körpers eines Patienten. Ein Arzt will den Tumor mit Hilfe von Strahlen zerstören. Der Arzt will verhindern, dass die Strahlen gesundes Gewebe zerstören. Daher kann ein hochintensiver Strahl nicht auf einem Weg auf den Tumor gerichtet werden. Um den Tumor zu zerstören, ist jedoch eine hohe Intensität der Strahlung erforderlich. Die Anwendung eines einzigen Strahls mit geringer Intensität wäre also nicht erfolgreich.“

Zur Vorbereitung auf dieses Zielproblem wurden unterschiedliche Ausgangsprobleme mit spezifischen Lösungsstrategien präsentiert.

Gick & Holyoak (1980) verwendeten das sogenannte Eroberungsproblem als Ausgangssituation:

„In der Mitte eines Landes befand sich eine Festung. Von der Festung gingen viele Straßen ab. Ein General wollte die Festung mit seiner Armee einnehmen. Der General wollte verhindern, dass auf den Straßen platzierte Minen seiner Armee schaden und die benachbarten Dörfer zerstören. Daher konnte die gesamte Armee die Festung nicht über eine einzige Straße angreifen. Um die Festung einzunehmen, wurde jedoch die gesamte Armee benötigt. Ein

Angriff einer kleinen Gruppe wäre also nicht erfolgreich gewesen.“

In drei Experimentalgruppen wurden dabei jeweils unterschiedliche Lösungsstrategien vorgegeben:

1. Aufteilung des Angriffs auf mehrere Straßen
2. Auskundschaften einer neuen, offenen Versorgungsrouten
3. Bau eines Tunnels zur Umgehung der Straßen

Holyoak & Koh (1987) entwickelten ein alternatives Ausgangsproblem, das thematisch näher an das Zielproblem angelehnt war, die Reparatur einer Glühbirne. Dieses wurde in zwei Varianten (Laserstrahl/Ultraschallquelle), wobei die Laser-Variante eine geringere Transferdistanz als die Ultraschallvariante erfordern soll. In Klammern ist jeweils die alternative Formulierung zur Ultraschallquelle angegeben:

„In einem Physiklabor befand sich eine teure Glühbirne für Experimente. Der Glühdraht innerhalb der Glühbirne war allerdings gebrochen (zusammengeschmolzen). Eine Forscherin wollte den Glühdraht mit Hilfe von Laserstrahlen (einer Ultraschallquelle) wieder zusammenschmelzen (trennen). Die Forscherin wollte verhindern, dass der Laserstrahl (Ultraschall) das zerbrechliche Glas der Glühbirne beschädigt. Daher kann ein hochintensiver Laserstrahl (eine hochintensive Ultraschallquelle) nicht auf einem Weg auf den Glühdraht gerichtet werden. Um den Glühdraht zusammenzuschmelzen (zu trennen), ist jedoch eine hohe Intensität des Lasers (der Ultraschallquelle) erforderlich. Die Anwendung eines einzigen Laserstrahls (einer einzigen Ultraschallquelle) mit geringer Intensität wäre also nicht erfolgreich.“

Auch hier bestand die vorgesehene Lösungsstrategie in der Aufteilung der Strahlung auf mehrere Quellen mit geringerer Intensität.

5.2.2. Seiter & Krabbe (2024)

Im Rahmen eines ersten Adaptionversuchs entwickelten Seiter & Krabbe (2024) ein neues, gesellschaftlich relevantes Zielproblem mit Bezug zur aktuellen Energiethematik:

„Aufgrund der Wende zu erneuerbaren Energien wird immer mehr Strom an der Nordsee mit Hilfe von Windkraftanlagen produziert, der anschließend in den Süden Deutschlands transportiert werden muss, da dort bisher nicht genügend erneuerbarer Strom erzeugt wird. Die Leitungen des Stromnetzes sind allerdings nicht für diese hohe Belastung ausgelegt. Durch zu hohe Belastungen könnte es zu Beschädigung und Stromausfällen kommen. Somit kann der Strom nicht über die momentanen Stromleitungen transportiert werden.“

Dieses Zielproblem wurde mit einem selbst entwickelten Ausgangsproblem kombiniert, dem sogenannten Schmugglerproblem:

„Eine Gruppe von Verbrechern wollte eine große Menge an Bargeld aus den Verkäufen von Drogen

über die Grenze ins Nachbarland schmuggeln, da sie es dort leichter ‚waschen‘ können. Die Polizei gründete allerdings eine Sonderkommission und setzte Spürhunde an den Grenzen ein. Das Auffliegen des Geldschmuggels würde große Verluste und schwere Konsequenzen für die Verbrecher bedeuten. Somit kann das Bargeld nicht über die bisher etablierten Schmuggelrouten transportiert werden.“

Zur Untersuchung der Übertragbarkeit unterschiedlicher Problemlösestrategien wurden auch in dieser Studie drei verschiedene Lösungsansätze vorgegeben, die den ProbandInnen in drei Experimentalgruppen präsentiert wurden:

1. Umwandlung des Geldes in Schmuck und anschließender Transport über die Grenze
2. Auskundschaften einer neuen, alternativen Schmuggelroute
3. Aufteilung des Geldes auf mehrere Fahrzeuge, die unabhängig voneinander die Grenze passieren

5.3. Stichprobe

Die Stichproben der vorliegenden Studie wurden basierend auf den beiden unterschiedlichen Zielproblemen (Tumorbehandlung und Energieversorgungsproblem) getrennt ausgewertet.

Für das Zielproblem der Tumorbehandlung umfasste die Stichprobe insgesamt $n = 282$ SchülerInnen. Die Verteilung nach Geschlecht war: männlich = 145, weiblich = 125, divers = 10, keine Angabe = 2. Das durchschnittliche Alter der Teilnehmenden betrug 14,4 Jahre.

Für das Zielproblem des Energieversorgungsproblems lag die Stichprobengröße bei $n = 190$. Die Geschlechterverteilung war: männlich = 98, weiblich = 85, divers = 5, keine Angabe = 2. Auch hier betrug das durchschnittliche Alter 14,4 Jahre. Alle Teilnehmenden besuchten ein Gymnasium, wobei sich die Erhebung über die Jahrgangsstufen von der 7. Klasse bis zur Oberstufe erstreckte.

6. Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse getrennt nach den beiden Zielproblemen vorgestellt.

6.1. Tumorbehandlung

Die Lösungen der ProbandInnen zum Zielproblem der Tumorbehandlung lassen sich anhand einer typenbildenden qualitativen Inhaltsanalyse nach Kuckartz (2018) in vier verschiedenen Strategien unterscheiden. Dabei wurden nur die Lösungen ausgewertet, die zu einer Genesung des Patienten beigetragen haben.

1. Aufteilung der Strahlung auf verschiedene Quellen mit geringerer Intensität (entspricht der analogen Strategie der Aufteilung)
2. Offener Zugang zum Umgehen des gesunden Gewebes, z.B. Minimalinvasive OP oder

Spektroskopie (entspricht dem Auskundschaften einer offenen Versorgungsrouten)

3. Operation zum Entfernen des Tumors (entspricht der Strategie des Tunnels)
4. Alternative Behandlung, z.B. Chemo-Therapie (keine analoge Strategie zu den Ausgangsproblemen)

Auf Grundlage der vier Kategorien wurden die ProbandInnen anhand der von Ihnen verwendeten Lösungsstrategien kodiert. Dabei war es möglich das in/eine Proband/Probandin mehrfach kodiert wurde, falls mehrere Strategien verwendet wurden. Die ProbandInnen wurden zur Bestimmung der Interkodierbarkeit von einer weiteren Person zweikodiert. Dem Zweitkodierer wurde dafür ein Kodiermanual mit Ankerbeispielen zur Verfügung gestellt. Der Wert für Cohens' $\kappa = .83$ berechnet nach Brennan und Prediger (1981) liegt im sehr guten Bereich (Döring, 2023).

In Tabelle 2 ist in einer Kreuztabelle der prozentuale Anteil der ProbandInnen bezogen auf die Grundgesamtheit der entsprechenden Experimental- bzw. Kontrollgruppe dargestellt, die jeweils die oben genannten Strategien zur Lösung des Tumorproblems verwendet haben.

Tab. 2: Prozentualer Anteil der ProbandInnen in den Experimental- bzw. Kontrollgruppen, die eine entsprechende Lösungsstrategie zur Tumorbehandlung vorgeschlagen haben

Strategie Gruppe	Aufteilung	Offener Zugang	Operation	Alternative Behandlung
Glühbirne Laser (Aufteilung)	88 %	31 %	25 %	29 %
Glühbirne Ultraschall (Aufteilung)	73 %	24 %	29 %	24 %
Eroberung (Aufteilung)	52 %	33 %	37 %	22 %
Eroberung (Offene Versorgungsrouten)	49 %	42 %	40 %	29 %
Eroberung (Tunnel)	47 %	58 %	38 %	24 %
Kontroll	51 %	43 %	33 %	37 %

In der roten Umrandung sind alle Experimentalgruppen mit der gleichen Lösungsstrategie in den Ausgangsproblemen zusammengefasst. Dabei verläuft die Transferdistanz zum Zielproblem von oben nach unten abnehmend. In der blauen Umrandung sind alle

Experimentalgruppen mit dem gleichen Ausgangsproblem (Eroberung) aber verschiedenen Lösungsstrategien zusammengefasst. In „fett“ sind jeweils die Zellen markiert, in denen nach den Hypothesen die höchsten prozentualen Anteile erwartet wurden. Im Falle der Aufteilungsstrategie erwartet man von oben nach unten durch die steigende Transferdistanz abnehmende Anteile, was sich auch zeigt. Bei den anderen Strategien erwartet man jeweils in dem „fett“ dargestellten Feld den höchsten Anteil bezogen auf die Zeile (H1) und Spalte (H2). Dies zeigt sich in der Tabelle nicht.

Ein zweiseitiger Pearson-Chi-Quadrat-Test zwischen der Gruppenzugehörigkeit und den verwendeten Strategien liefert keinen statistischen Zusammenhang $\chi^2(15) = 22.10, p = .105, \text{Cramer's } V = .13$.

In einer zweiten Auswertung wurde jeweils für die ProbandInnen ausschließlich die zuerst genannte Strategie kodiert, so dass pro ProbandIn nur eine Strategie möglich war (vorausgesetzt, das Zielproblem wurde gelöst). Tabelle 3 zeigt eine Kreuztabelle, in der dargestellt ist, wie viele ProbandInnen aus den Experimental- und Kontrollgruppen jeweils eine der genannten Strategien als erste Lösung angegeben haben. Die Darstellung erfolgt analog zu Tabelle 2.

Tab. 3: Prozentualer Anteil der ProbandInnen in den Experimental- bzw. Kontrollgruppen, die eine entsprechende Lösungsstrategie zur Tumorbehandlung als erstes vorgeschlagen haben

Strategie \ Gruppe	Aufteilung	Offener Zugang	Operation	Alternative Behandlung
Glühbirne Laser (Aufteilung)	82 %	4 %	4 %	4 %
Glühbirne Ultraschall (Aufteilung)	69 %	4 %	11 %	2 %
Eroberung (Aufteilung)	43 %	20 %	15 %	2 %
Eroberung (Offene Versorgungsrouten)	36 %	22 %	18 %	9 %
Eroberung (Tunnel)	33 %	38 %	22 %	0 %
Kontroll	45 %	24 %	8 %	12 %

Ein zweiseitiger Pearson-Chi-Quadrat-Test zwischen der Gruppenzugehörigkeit und den verwendeten Strategien liefert hier einen höchst signifikanten Zusammenhang $\chi^2(15) = 54.15, p < .001$ bei einer kleinen Effektstärke Cramer's $V = .27$ (Cohens, 1988).

Als dritte mögliche Auswertung wurden nur diejenige ProbandInnen berücksichtigt, für die das Zielproblem der Tumorbehandlung unbenannt war. Entsprechend reduziert sich in diesem Fall die Stichprobe der ProbandInnen auf $n = 195$. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4 nach dem gleichem Schema wie schon in Tabelle 2 dargestellt. Ein zweiseitiger Pearson-Chi-Quadrat-Test liefert in diesem Fall einen signifikanten Zusammenhang $\chi^2(15) = 25.42, p < .05$ bei einer kleinen Effektstärke Cramer's $V = .16$ (Cohens, 1988).

Tab. 4: Prozentualer Anteil der ProbandInnen in den Experimental- bzw. Kontrollgruppen, die eine entsprechende Lösungsstrategie zur Tumorbehandlung vorgeschlagen haben, wobei das Tumorproblem unbekannt war

Strategie \ Gruppe	Aufteilung	Offener Zugang	Operation	Alternative Behandlung
Glühbirne Laser (Aufteilung)	92 %	31 %	25 %	33 %
Glühbirne Ultraschall (Aufteilung)	76 %	26 %	26 %	24 %
Eroberung (Aufteilung)	57 %	36 %	43 %	25 %
Eroberung (Offene Versorgungsrouten)	50 %	50 %	36 %	18 %
Eroberung (Tunnel)	47 %	63 %	34 %	16 %
Kontroll	46 %	41 %	32 %	46 %

Bei einer letzten Auswertung mit der Kombination aus erstgenannter Strategie und Unbekanntheit des Zielproblems liefert ein zweiseitiger Pearson-Chi-Quadrat-Test einen höchst signifikanten Zusammenhang zwischen der Gruppenzugehörigkeit und der verwendeten Strategie $\chi^2(15) = 46.72, p < .001$ bei einer mittleren Effektstärke Cramer's $V = .30$ (Cohens, 1988). Die größten Häufigkeiten der dazugehörigen Kreuztabelle sind vergleichbar mit der Verteilung in Tabelle 3.

6.2. Energieversorgungsproblem

Die Auswertung der Daten zum Energieversorgungsproblem verlief analog zur der des Tumorproblems (siehe 6.1). Auch hier konnten in einer typenbildenden qualitativen Inhaltsanalyse nach Kuckartz (2018) vier verschiedenen Strategien zur Lösung des Energieversorgungsproblems identifiziert werden:

1. Umwandlung der elektrischen Energie in eine andere Energieform, welche dann transportiert und

später wieder zurück umgewandelt wird (entspricht der Umwandlung des Geldes).

2. Neue Leitungen verlegen, wobei die Energiemenge unverändert bleibt (entspricht der neuen Schmutzroute).
3. Aufteilung der elektrischen Energie bzw. Zwischenspeicherung, ohne Veränderung an den Leitungen (entspricht der Aufteilungsstrategie).
4. Optimierung der vorhandenen Leitungen (entspricht keiner der vorgegeben Strategien)

Auch hier wurden nur die Lösungen ausgewertet, welche das eigentliche Transportproblem der Energie gelöst haben. Lösungen, die das Transportproblem umgangen (z.B. Stromsparmaßnahmen) oder gar nicht gelöst haben, wurden nicht ausgewertet. Die Strategien decken sich denen aus der Studie von Seiter & Krabbe (2024).

Für die Kodierung der ProbandInnen wurde die Inter-codereliabilität mittels Zweitkodierer überprüft. Der Wert für Cohens' $\kappa = .79$ berechnet nach Brennan und Prediger (1981) liegt auch hier im sehr guten Bereich (Döring, 2023).

In Tabelle 5 sind die prozentualen Anteile der ProbandInnen bezogen auf die Grundgesamtheit der entsprechenden Experimental- bzw. Kontrollgruppe dargestellt, die jeweils die oben genannten Strategien zur Lösung des Energieversorgungsproblems verwendet haben. In „fett“ sind erneut die Zellen markiert, in denen nach den Hypothesen die höchsten prozentualen Anteile erwartet wurden.

Tab. 5: Prozentualer Anteil der ProbandInnen in den Experimental- bzw. Kontrollgruppen, die eine entsprechende Lösungsstrategie zur Energieversorgungsproblem vorge schlagen haben

Strategie Gruppe	Umwandlung	Neue Leitung	Aufteilung	Optimierung
Umwandlung	35 %	70 %	30 %	39 %
Neue Route	19 %	54 %	31 %	44 %
Aufteilung	25 %	52 %	65 %	50 %
Kontroll	25 %	56 %	23 %	50 %

Ein zweiseitiger Pearson-Chi-Quadrat-Test zwischen der Gruppenzugehörigkeit und den verwendeten Strategien liefert keinen statistischen Zusammenhang $\chi^2(9) = 13.68, p = .134$ bei einer kleinen Effektstärke Cramer's $V = .12$ (Cohens, 1988).

Alle weiteren Auswertungsmöglichkeiten wie die Betrachtung der erstgenannten Strategie oder die Einschränkung der Stichprobe auf die ProbandInnen,

denen das Energieversorgungsproblem unbekannt war, werden in keinem Fall signifikant.

7. Diskussion

Ziel dieser Studie war es zu untersuchen, inwiefern eine vorgegebene Problemsituation mit einer spezifischen Lösungsstrategie das Lösungsverhalten von ProbandInnen in einer analogen Problemsituation beeinflusst.

Die Ergebnisse zeigen, dass die zentralen Befunde von Gick & Holyoak (1980) sowie Holyoak & Koh (1987) nicht vollständig reproduziert werden konnten. Ein signifikanter Transfereffekt lässt sich nur in Bezug auf die Aufteilungsstrategie feststellen und auch nur dann, wenn nur die erstgenannte Strategie der ProbandInnen betrachtet werden oder die Stichprobe auf die ProbandInnen eingeschränkt wird, für die das Tumorproblem unbekannt war. In Bezug auf alle anderen Strategien zeigt sich sowohl in der Replikation mit den Originalanalogien als auch mit den selbst erstellten Analogien kein Transfereffekt. Die Hypothesen H1 und H2 müssen daher mit Ausnahme der Aufteilungsstrategie in der oben genannten Einschränkung verworfen werden. Besonders relevant ist im Falle der Aufteilungsstrategie der beobachtete Einfluss der Transferdistanz. In Übereinstimmung mit den Befunden von Holyoak & Koh (1987) zeigt sich, dass eine geringere Distanz zwischen Ausgangs- und Zielproblem die Wahrscheinlichkeit eines erfolgreichen Analogietransfers erhöht. Dies stützt Hypothese H3 und verdeutlicht die Bedeutung struktureller Nähe im Analogietransfer.

Die Ergebnissen scheinen daher in Bezug auf die Studien von Gick & Holyoak (1980) und Holyoak & Koh (1987) nicht unabhängig von den Probandengruppen zu sein (z.B. Alter, Hintergrund oder Vorwissen). Dies zeigt sich in dieser Studie beispielweise, wenn nur die ProbandInnen ausgewertet werden, denen das Zielproblem unbekannt war. Der potenzielle Einfluss von Personenmerkmalen spricht für die Verwendung einer modernen Transfertheorie wie dem Actor-Oriented Model of Transfer (Lobato, 2003), welches eine Interaktion zwischen Personen- und Aufgabenmerkmalen beim Transfer berücksichtigt.

In Bezug auf das Modell von Gray & Holyoak (2021) lassen sich die Ergebnisse dieser Studie weiter einordnen. Die ProbandInnen wurden in dieser Studie explizit darauf hingewiesen, die Ausgangsgeschichte als Hilfestellen zur Lösung des Zielproblems zu verwenden. Der Transfer ist allerdings selbst bei expliziter Aufforderung nicht immer gegeben. Eine Aufforderung sorgt womöglich nicht automatisch für den notwendigen Access. Der Einfluss von Transferdistanzen konnten zwar bei erfolgreichem Transfer repliziert werden. Es bleibt aber unklar, ob sich dieser Einfluss auf den Prozess Access, Mapping oder Inference bezieht. Insgesamt bleibt es unklar, welchen Einfluss die Verwendung von verschiedenen Ziel- und Ausgangsprobleme und Strategien auf Access, Mapping und Inference haben.

8. Fazit

Die Ergebnisse dieser Studie liefern einen kritischen Blick auf den Analogietransfer. Die Ergebnisse aus den Studien von Gick & Holyoak (1980) und Holyoak & Koh (1987) können nicht unbedingt auf andere Personengruppen und andere Ziel- und Ausgangsproblem übertragen werden. Der Analogietransfer scheint also nicht allein durch die Problemsituationen bestimmt zu werden, sondern auch durch Personenmerkmale. Damit ließe sich auch erklären, dass sich der Analogietransfer für gleiche Problemsituationen über die Zeit verändert hat. Einzig der Einfluss der Transferdistanz konnte nachgewiesen werden. Das Modell von Gray & Holyoak (2021) ist zudem noch nicht ausreichend empirisch erforscht, um Aussagen über den Einfluss auf die verschiedenen Tätigkeiten Access, Mapping und Inference machen können. Diese Beforschung der Tätigkeiten ist daher zunächst notwendig, bevor Aussagen über Analogietransfer in Bezug auf SSI gemacht werden können.

9. Literatur

- Brennan, R.L. & Prediger, D. J. (1981). Coefficient κ : Some uses, misuses, and alternatives. *Educational and Psychological Measurement*, 41, 687–699.
- Brown, A. L., Kane, M. J. & Echols, C. H. (1986). Young children's mental models determine analogical transfer across problems with a common goal structure. *Cognitive Development*, 1(2), 103-121.
- Catrambone, R. & Holyoak, K. J. (1987). Transfer in problem solving as a function of the procedural variety of training examples. In *Proceedings of the 9th Annual Conference of the Cognitive Science Society*. Hillsdale, N.J.: Erlbaum.
- Catrambone, R. & Holyoak, K. J. (1989). Overcoming contextual limitations on problemsolving transfer. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 15, 1147-1156.
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences (2nd ed.)*. Hillsdale, N.J.: L. Erlbaum Associates.
- Döring, N. (2023). *Forschungsmethoden und Evaluation in den Sozial- und Humanwissenschaften*. Springer.
- Gick, M. L. & Holyoak, K. J. (1980). Analogical problem solving. *Cognitive Psychology*, 12, 306-365.
- Gick, M. L. & Holyoak, K. J. (1983). Schema induction and analogical transfer. *Cognitive Psychology*, 15, 1-38.
- Gray, M. E. & Holyoak, K. J. (2021). Teaching by analogy: From theory to practice. *Mind, Brain, and Education*, 15, 250-263.
- Holyoak, K. J., Junn, E. N. & Billman, D. O. (1984). Development of analogical problemsolving skills. *Child Development*, 55, 2042-2055.
- Holyoak, K. J. & Koh, K. (1987). Surface and structural similarity in analogical transfer. *Memory & Cognition*, 15, 323-340.
- Kintsch, W. & Van Dijk, T. A. (1978). Toward a model of text comprehension and production. *Psychological Review*, 85, 363-394.
- Kubricht, J. R., Lu, H. & Holyoak, K. J. (2015). Animation Facilitates Source Understanding and Spontaneous Analogical Transfer. In R. Dale, C. Jennings, P. Maglio, T. Matlock, D. Noelle, A. Warfaumont & J. Yoshimi (Eds.), *Proceedings of the 37th Annual Conference of the Cognitive Science Society*, Austin, TX: Cognitive Science Society.
- Kubricht, J. R., Lu, H., & Holyoak, K. J. (2017). Intuitive physics: Current research and controversies. *Trends in Cognitive Sciences*, 21, 749-759.
- Kuckartz, U. (2018). *Qualitative Inhaltsanalyse. Methoden, Praxis, Computerunterstützung (4. Aufl.)*. Weinheim, Basel: Beltz Juventa.
- Lobato, J. E. (2003). How design experiments can in form a rethinking of transfer and vice versa. *Educational Researcher*, 32(1), 17-20.
- Schmid, C. (2006). *Lernen und Transfer: Kritik der didaktischen Steuerung*. Bern: hep-Verlag.
- Seiter, M. & Krabbe, H. (2024). Transfer bei analogen Problemsituationen: Eine Replikationsstudie. *PhyDid B – Didaktik Der Physik – Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung 2024*.
- Vendetti, M. S., Matlen, B. J., Richland, L. E., & Bunge, S. A. (2015). Analogical reasoning in the classroom: Insights from cognitive science. *Mind, Brain, and Education*, 9(2), 100-10

AufGezeichnet gelernt

- Lernen mit Zeichnungen im Kontext physikalischer Inhalte -

Peter Michael Westhoff, Susanne Heinicke

Institut für Didaktik der Physik, Universität Münster, Wilhelm-Klemm-Str. 10, 48149 Münster
peterm.westhoff@uni-muenster.de, susanne.heinicke@uni-muenster.de

Kurzfassung

Im Forschungsprojekt wird die Effektivität von vier verschiedenen zeichnerischen Methoden (Betrachten, Abzeichnen, Ergänzen und Freizeichnen) auf das Leseverstehen und die Konzeptbildung von Lernenden im naturwissenschaftlichen Unterricht beforscht und in Verbindung mit personenbezogenen Merkmalen gesetzt. Bei der im Folgenden beschriebenen ersten Auswertung zeigen sich Tendenzen, dass die Methode des „Ergänzens“ von Zeichnungen die besten Ergebnisse in Bezug auf die Nennung richtiger Konzeptbausteine und das geringste Auftreten von Fehlvorstellungen erzielt. Das „Freizeichnen“ zeigt ebenfalls im Bezug auf den Lernerfolg vielversprechende Ergebnisse. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass zeichnerische Methoden, insbesondere das Ergänzen und Freizeichnen, das Lernen und Verstehen von naturwissenschaftlichen Konzepten fördern können. Die Analyse weiterer Daten ist zur weiteren Klärung notwendig. Im Folgenden soll vor allem die Analysemethode in den Blick genommen werden.

1. Einleitung

Im naturwissenschaftlichen Unterricht werden Inhalte häufig durch eine Kombination aus Texten und verschiedenen nicht-(fließ-)textlichen Darstellungsformen vermittelt.

Visualisierungen unterstützen das Lernen und Erinnern fachlicher Inhalte, indem sie Lernende dazu anregen, Informationen aktiv zu verarbeiten (Fiorella & Zhang, 2018). Die eigenständige Anfertigung von Zeichnungen stellt dabei eine besonders anspruchsvolle Form der kognitiven Aktivierung dar, da Lernende Informationen auswählen, strukturieren und in eine bildliche Darstellung überführen müssen. Studien zeigen, dass das Zeichnen beim Lernen insbesondere das metakognitive Monitoring, also die Überwachung des eigenen Lernfortschritts, fördert. Allerdings ist ein unmittelbarer Zugewinn an Lernerfolg nicht immer garantiert und hängt stark vom Kontext, den jeweiligen Kompetenzen und Vorwissen ab. So kann das Zeichnen zu fachlich unzureichenden Darstellungen führen oder mehr Zeit in Anspruch nehmen als das reine Betrachten von Visualisierungen (Kollmer et al., 2020).

Vor diesem Hintergrund untersucht die vorliegende Studie die Effektivität von vier verschiedenen zeichnerischen Methoden – dem Betrachten, Abzeichnen, Ergänzen und Freizeichnen – auf den Lernerfolg und insbesondere auf die Konzeptbildung von Lernenden. Um die Wirksamkeit dieser Methoden differenziert zu erfassen, werden verschiedene Auswertungsansätze kombiniert. Zunächst erfolgt eine Bewertung des Konzeptverständnisses, indem analysiert wird, inwieweit die Lernenden zentrale fachliche

Zusammenhänge korrekt und vollständig in ihren Antworten darstellen. Darüber hinaus werden die Lernendenantworten auf Fehlvorstellungen untersucht, um zu identifizieren, welche Missverständnisse oder alternativen Konzepte im Lernprozess auftreten und wie diese durch die jeweilige Methode beeinflusst werden. Ergänzend dazu wird eine relative Bewertung der Korrektheit vorgenommen, bei der die Lernendenantworten hinsichtlich ihrer fachlichen Genauigkeit und Angemessenheit eingeordnet werden. Diese mehrdimensionale Auswertung ermöglicht es, nicht nur den Grad des erworbenen Verständnisses, sondern auch die Qualität und Tiefe der Konzeptbildung sowie die Persistenz oder Überwindung von Fehlvorstellungen differenziert zu erfassen.

2. Theoretische Grundlagen

Im Rahmen der Betrachtung von Methoden im Zusammenhang mit Zeichnungen lässt sich die Literatur in drei Bereiche untergliedern: Rezeption, Produktion und geführte Produktion. Dabei unterscheiden sich diese im Umfang der eigenständigen Bildgenerierung.

2.1. Rezeption

Mit Blick auf die Rezeption von Visualisierungen im Lernprozess beschreiben die Theorien von Mayer (2009 und 2014), Clark und Paivio (1991) sowie Schnotz (2002 und 2014) verschiedene Erkenntnisse. Die Cognitive Theory of Multimedia Learning (CTML) von Mayer besagt, dass Lernende Informationen aus multimedialen Lernmaterialien über zwei separate Kanäle aufnehmen und verarbeiten: Bilder über den visuellen Kanal und

auditive Eindrücke über den sprachlichen Kanal. Dieser Ansatz wird durch die Dual-Coding-Theorie (DCT) von Paivio (1991) unterstützt. Diese besagt, dass Informationen im menschlichen Gehirn auf zwei verschiedenen Wegen verarbeitet werden: dem verbalen und dem nonverbalen. Die Kombination von Texten und Visualisierungen führt laut Mayer (2014) zu einer besseren Verarbeitung und Speicherung von Informationen, da beide Wege parallel arbeiten und sich gegenseitig ergänzen.

Das „Integrated Model of Text and Picture Comprehension“ von Schnotz (2014) baut auf diesen Theorien auf und beschreibt, wie Menschen Informationen aus Texten und Bildern aufnehmen, verarbeiten und zu einem kohärenten Verständnis zusammenführen. Es basiert auf der Annahme, dass Texte und Bilder unterschiedliche Repräsentationsformate nutzen. Die Integration von Text und Bild erfordert, dass Lernende beide Formate aktiv verarbeiten und deren Inhalte aufeinander beziehen. Durch die Kombination von Texten und Visualisierungen können Lernende ein umfassenderes Verständnis des Lernstoffs erlangen (Zhang & Fiorella, 2018), wie es auch die CTML von Mayer vorschlägt. Die DCT von Clark & Paivio stützt diese Annahme, indem sie zeigt, dass die Verarbeitung von Visualisierungen direkt in den nonverbalen Weg eingebracht und dort verarbeitet wird, während die Verarbeitung von Texten den verbalen Weg nutzt. Die kontinuierliche Integration von Text und Bild hat einen positiven Einfluss auf die Fähigkeit von Lernenden, Informationen zu verarbeiten und zu speichern (vgl. Schnotz, 2014).

2.2. Produktion

In der Weiterführung und mit dem Ziel, die Lernenden zu aktivieren, ist die selbstständige Produktion von Zeichnungen genauer in den Blick zu nehmen. Dabei kommt häufig die selbstregulierende, generative Lernstrategie des „Sinnstiftenden Zeichnens“ zum Einsatz (Leutner & Opfermann, 2013). Die positiven Auswirkungen dieses selbstentwickelnden Prozesses einer Zeichnung zu zentralen Inhalten eines Textes sowie die tiefere und reflektierte Konstruktion mentaler Modelle werden auch in den Theorien von van Meter und Firetto (2013) beschrieben.

Die theoretische Basis dafür bildet die „Generative Theory of Drawing Construction“ von van Meter und Garner (2005). Nach dieser Theorie lässt sich die Wirksamkeit des Lernens mit selbst erzeugten Bildern darauf zurückführen, dass dadurch kognitive und metakognitive Verarbeitungsprozesse besonders angeregt werden. Im Einklang mit multimedialen Lerntheorien gehen van Meter und Garner (2005) davon aus, dass beim Umsetzen eines im Text beschriebenen Sachverhalts in eine eigene Zeichnung die drei kognitiven Prozesse Selektion, Organisation und Integration aktiv durchlaufen werden. Insbesondere das Integrieren von Text- und

Bildinformationen wird beim eigenständigen Zeichnen gefördert, da Lernende explizite Verbindungen zwischen Text und den zu zeichnenden Bildelementen herstellen müssen (van Meter & Garner, 2005).

Darüber hinaus wird davon ausgegangen, dass das Lernen mit selbst erstellten Bildern metakognitive Prozesse verstärkt. Insbesondere die Überwachung des eigenen Lernprozesses wird gefördert, da Lernende beim Zeichnen unmittelbar Rückmeldung darüber erhalten, ob sie ihre innere Vorstellung tatsächlich in eine äußere Darstellung umsetzen können. Diese metakognitive Überwachung kann das Erkennen von Verständnisproblemen erleichtern, was wiederum zur Aktivierung kognitiver Strategien, wie dem erneuten Lesen bestimmter Textpassagen, führen kann. Hinweise auf diese Prozesse liefert eine Studie von van Meter (2001). In dieser Studie wurden Lernende dazu angeleitet, ein Bild zu einem Text zu zeichnen. Die Lernenden nutzten deutlich häufiger Selbstüberwachungs- und Überarbeitungsstrategien als Lernende, die mit einer vorgegebenen Text-Bild-Kombination arbeiteten. Auch Leopold und Leutner (2002) stellen fest, dass Elftklässler, die beim Lernen aus einem Sachtext eigene Bilder anfertigten, häufiger metakognitive Strategien einsetzten.

Aus Sicht der Modelle zum selbstregulierten Lernen spielen neben kognitiven und metakognitiven auch motivationale Faktoren eine Rolle (vgl. Zimmerman & Schunk, 2001). So können positive Anreize, die mit der Tätigkeit des Zeichnens verbunden sind, die lernförderliche Wirkung selbst erzeugter Bilder zusätzlich verstärken (vgl. Rheinberg, 2000).

Die positiven Effekte des Lernens mit selbst erzeugten Bildern konnten in mehreren Studien empirisch nachgewiesen werden (Lesgold, DeGood & Levin, 1977; Lesgold, Levin, Shimron & Guttman, 1975; van Meter, 2001; van Meter & Garner, 2005). Es existieren allerdings auch Untersuchungen, die keine positiven Effekte auf das Textverständnis zeigen (Leutner, Leopold & Sumfleth, 2009; van Meter & Garner, 2005).

2.3. Geführte Produktion

Die Forschung zum Lernen mit selbst generierten Bildern zeigt eine differenzierte Befundlage: Während das eigenständige Zeichnen von Bildern das Textverständnis und den Lernerfolg potenziell fördern kann, sind die tatsächlichen Effekte stark von verschiedenen Einflussfaktoren abhängig. Zentrale Bedeutung kommt dabei der Qualität der Zeichnungen zu (Leopold, 2009; van Meter, 2001; van Meter et al., 2006). Gleichzeitig kann eine erhöhte extrinsische kognitive Belastung, etwa durch das gleichzeitige Lesen und Zeichnen, den Lernerfolg beeinträchtigen (Sweller, 1999, 2005; Leutner et al., 2009). Studien zeigen, dass das bloße Anweisen zum Zeichnen ohne weitere Unterstützung oftmals nicht lernförderlich ist, während gezielte instruktionale Hilfestellungen – wie das Ergänzen vorgegebener

Bildelemente oder der Vergleich mit Expertenzeichnungen – das Textverständnis signifikant verbessern können (Lesgold et al., 1975, 1977; van Meter et al., 2006).

Diese Befunde unterstreichen, dass der Lernprozess individuell verläuft und von Faktoren wie Vorwissen, kognitiver Kapazität und Motivation beeinflusst wird (Mayer, 2002). Mayer betont, dass Lernen ein aktiver, selbstgesteuerter Prozess ist, bei dem Lernende Informationen auswählen, organisieren und mit vorhandenem Wissen verknüpfen. Aufgrund der begrenzten Verarbeitungskapazität jedes Einzelnen ist die Gefahr einer kognitiven Überlastung besonders bei komplexen Aufgaben wie dem gleichzeitigen Lesen und Zeichnen groß. Daher ist die gezielte instruktionale Unterstützung, beispielsweise durch das Ergänzen unvollständiger Grafiken, eine vielversprechende Methode, um den Lernprozess zu erleichtern und das Leseverstehen zu fördern (Ainsworth & Scheiter, 2021; Fiorella & Zhang, 2018; Schmeck et al., 2014; Kollmer et al., 2020).

Für die Unterrichtspraxis ergibt sich daraus die Empfehlung, generierende Methoden wie das Zeichnen nicht isoliert, sondern in Kombination mit gezielten Unterstützungsmaßnahmen einzusetzen, um individuelle Unterschiede zu berücksichtigen und den Lernerfolg nachhaltig zu steigern.

3. Forschungsfragen

Anknüpfend an den aktuellen Forschungsstand werden die Zusammenhänge zwischen der Lernförderlichkeit von Methoden im Umgang mit Zeichnungen und mit besonderem Blick auf die Heterogenität der Lernenden betrachtet. Das ganze Projekt ist aufgeteilt in mehrere Teilstudien. Die erste Teilstudie nimmt personenbezogene Merkmale hinsichtlich u.a. der Kreativität und Motivation zum Zeichnen oder dem Fachinteresse in den Blick.

In dieser zweiten, im Folgenden beschriebenen Teilstudie liegt der Fokus auf dem Lernen und befasst sich mit der Beantwortung zweier Fragen.

1. Lernförderlichkeit Zeichenaktivität – Wie unterscheidet sich das Lernen mit und ohne Zeichenaktivität bei der Erschließung naturwissenschaftlicher Texte?

Das Lernen wird dabei an vier abhängigen Variablen „Wissenstand“, „Motivation“, „kognitive Anstrengung“ und „subjektives Lernempfinden“ gemessen. Gerade im Hinblick auf die zunehmende Digitalisierung und damit die Möglichkeit, Abbildungen wie das Tafelbild schnell und einfach abzufotografieren, ist es hilfreich zu wissen, ob sich bezüglich des Leseverstehens der zeitliche Aufwand lohnt, dass die Lernenden ihre eigenen Abbildungen zeichnen.

2. Lernförderlichkeit – Bildgenerierung – Wie unterscheidet sich das Lernen mit unterschiedlichem Umfang der zeichnerischen

Bildgenerierung bei der Erschließung naturwissenschaftlicher Texte?

So werden die generierenden Methoden Abzeichnen, Ergänzen und Freizeichnen untereinander verglichen, die sich im Grad der Entwicklung bzw. Zusammenstellung der Grafiken unterscheiden.

Ein letzter Studienteil befasst sich anschließend mit der der Kombination beider Teilstudien und beleuchtet mögliche Zusammenhänge zwischen den personenbezogenen Merkmalen und der Lernförderlichkeit der Methoden.

4. Studiendesign:

In der vorliegenden Studie wurde untersucht, welchen Einfluss verschiedene Methoden der aktiven Textverarbeitung auf den Wissenszuwachs, die Motivation und die kognitive Belastung von Lernenden (Gymnasium und Gesamtschule) haben. Ziel der Untersuchung war es, zu erfassen, wie sich die Methode der Bearbeitung eines Textes auf den individuellen Lernprozess auswirken.

Dazu erhielten die Teilnehmenden jeweils einen von zwei Sachtexten, die altersgerecht aufbereitet waren und naturwissenschaftliche Themen behandelten. Der erste Text mit dem Titel „Ente auf Eis – Wärmeschutz der Ente“ thematisiert die Prinzipien der Wärmeisolation einer Ente im Winter, während der zweite Text „Leuchten am Himmel – Die Polarlichter“ physikalische Grundlagen atmosphärischer Erscheinungen erklärt. Die Texte sind strukturell gleich aufgebaut aus einer Einleitung und drei weiteren Textabschnitten, inhaltlich baute der Text über Polarlichter jedoch stärker aufeinander auf.

Alle Lernenden arbeitete ausschließlich mit einem der beiden Texte. Die Zuweisung der Bearbeitungsmethode erfolgte jeweils pro Klasse und wurde jeweils vorgegeben. Die Methoden umfassten das reine Betrachten der Bilder im Text, das Abzeichnen der Abbildungen, das Ergänzen von vorgegebenen Zeichnungen sowie das Freizeichnen von Inhalten ohne Vorlage. Dadurch sollte erfasst werden, ob und wie sich unterschiedliche Grade der aktiven Auseinandersetzung mit visuellen Inhalten auf den Lernprozess auswirken.

Für die Bearbeitung der Aufgabe stand maximal eine Schulstunde mit 45 Minuten zur Verfügung. Im Anschluss an die Bearbeitungsphase wurde ein Wissenstest durchgeführt, der aus drei offenen Fragen sowie zwölf geschlossenen Verifizierungsaufgaben bestand. Dieser Test wurde auch vor Beginn der Lernphase (Pre-Test) sowie ca. 3 Wochen nach der Intervention (Follow-Up) eingesetzt, um kurzfristige und langfristige Lernwirkungen zu erfassen. Zusätzlich wurden im direkten Anschluss an die Bearbeitung (Post-Test) Fragen zur Lernmotivation und zur subjektiv wahrgenommenen kognitiven Belastung gestellt, um emotionale und kognitive Begleitfaktoren des Lernprozesses zu erfassen.

Das Studiendesign folgt somit einem klassischen Pre-Post-Follow-Up-Ansatz mit einer zwischen den Gruppen variierten Kombination aus Textinhalt und Bearbeitungsmethode. Durch diesen Aufbau sollte ermittelt werden, inwiefern unterschiedliche Zugänge zur Verarbeitung von Lernmaterial – insbesondere im Hinblick auf Visualisierungsstrategien – den Lernerfolg und die damit verbundenen motivationalen und kognitiven Prozesse beeinflussen. Die Ergebnisse der Studie versprechen Aufschluss darüber, welche Formen der aktiven Bildverarbeitung im schulischen Kontext besonders förderlich für den Wissenserwerb sind und wie Lernende mit unterschiedlichen Voraussetzungen von spezifischen didaktischen Maßnahmen profitieren können.

5. Studienbeschreibung

Die Datenerhebung für die Studie fand zwischen November 2024 und Februar 2025 statt. Insgesamt nahmen 333 Lernende der 8. und 9. Klassenstufe an der gesamten Studie teil. Die Stichprobe setzte sich zu 49 % aus weiblichen und zu 51 % aus männlichen Teilnehmenden zusammen. Der Großteil der Lernenden besuchte ein Gymnasium (83 %), 17 % eine Gesamtschule.

Die Gruppengröße pro Kombination aus Text und Methode lag bei etwa 40 Lernende (± 5). Dieses Design ermöglichte einen Vergleich der Wirksamkeit verschiedener visueller Bearbeitungsformen im schulischen Kontext.

6. Auswertung der offenen Fragen

Die Auswertung des Wissenstests befindet sich derzeit in der Analysephase. Eine erste Betrachtung der geschlossenen Items in einer Pilotstudie zeigt lediglich eine leichte Tendenz, jedoch keine signifikanten Unterschiede im Lernzuwachs zwischen den Bearbeitungsgruppen vom Pre- zum Posttest. Auch andere Studien haben darauf hingewiesen, dass geschlossene Fragen hier nicht genügend aussagekräftig zu sein scheinen (Kollmer et al., 2020). Daher sind in der vorliegenden Studie auch offene Items eingebunden, die genauer das konzeptionelle Verständnis der Inhalte auflösen können.

Vor diesem Hintergrund richtet sich der Fokus nun auf die offenen Antworten. Diese bieten die Möglichkeit, qualitative Unterschiede im Verständnis sowie in der Tiefe der inhaltlichen Auseinandersetzung mit dem Lernstoff genauer zu beleuchten.

Die Auswertung der Lernergebnisse erfolgt in drei Schritten (unten genauer beschrieben).

1. Zunächst wird eine absolute Bewertung vorgenommen, indem die Antworten der Lernenden entsprechend der im Text enthaltenen Konzepte paraphrasiert und die Anzahl der enthaltenen Konzeptbausteine entsprechend eines

selbstentwickelten Kodier-/Bewertungsleitfadens gezählt werden (siehe 6.1).

2. Im zweiten Schritt werden die auftretenden Fehlvorstellungen mithilfe einer induktiven Kodierung systematisch erfasst und kategorisiert (siehe 6.2).
3. Abschließend erfolgt eine relative Bewertung der Korrektheit auf einer fünfstufigen Likert-Skala, die – im Gegensatz zur eher objektiven, absoluten Bewertung – einen interpretativen Charakter hat und der Einschätzung durch Lehrkräfte nahekommt (siehe 6.3).

6.1. Analyse des Konzeptgedankens

Zur Erfassung des inhaltlichen Verständnisses der Lernenden wurden drei offene Fragen zum Textinhalt gestellt. Diese offenen Aufgaben ermöglichen es den Lernenden, sich differenziert zu verschiedenen Aspekten des Textes zu äußern. Die Auswertung der Antworten erfolgt im Rahmen einer qualitativen Inhaltsanalyse, bei der die Lernendenäußerungen zunächst paraphrasiert und anschließend kodierend in Bezug auf fachliche Konzepte ausgewertet werden.

Die Analyse orientiert sich an einem konzeptgeleiteten Kodierleitfaden, der auf Grundlage der gegebenen Texte erstellt wurde und in drei Stufen gegliedert ist: Begriffe, Grundwissen (Allgemeinwissen) und Konzepte (für das Verständnis des Sachverhalts wichtig).

Besonderes Augenmerk liegt gerade beim Text über Polarlichter auf den fachlichen Konzepten, die zentral im Text vermittelt werden, inhaltlich aufeinander aufbauen bzw. ineinandergreifen und so durch die visuelle, mehrdimensionale Herangehensweise besonders bearbeitet und gefördert werden können. Diese Konzepte lassen sich inhaltlich abgrenzen und bilden die Grundlage für die konzeptbezogene Auswertung. In dem Text über Polarlichter wurden 5 Konzepte identifiziert: „Zusammenstoß der Teilchen“, „Schutz / Ablenkung der Teilchen“, „Schwachstelle im Schutzschild“, „Farben der Polarlichter“ und „Intensität der Polarlichter“.

Ein Konzept wird definiert als ein Begriff oder ein System von Komponenten, das dazu dient, ein Phänomen zu beschreiben. Es setzt sich aus zwei Komponenten zusammen, die in Beziehung zueinander stehen, miteinander in Aktion treten und bestimmte Merkmale tragen. Am Beispiel des Konzepts „Zusammenstoß“ lässt sich dies verdeutlichen (vgl. Abbildung unten):

Das Konzept „Zusammenstoß“ besteht aus zwei Komponenten, den „Teilchen von extern“ und den „Teilchen von intern“. Diese treten miteinander in Aktion (z.B. „Sie treffen aufeinander“), was wiederum eine oder mehrere Reaktionen nach sich zieht (z.B. „Es leuchtet“, „Energie wird frei“). Zusätzlich können Konzepten verschiedene Attributionen wie eine Lokalisation oder

Proportionen zugeordnet werden (z.B. „an den Polen“, „Je mehr..., desto...“.

Die Lernendenantworten zeigen, dass die Lernenden bei der Beschreibung eines Konzeptes unterschiedliche Begriffe oder Beschreibungen verwenden. Inhaltlich werden die Prozesse jedoch sinngemäß beschrieben. So wird beispielsweise die Reaktion des Zusammenstoßes der Teilchen mal als „(Polar-) Lichter“ und ein anderes Mal als „freiwerdende Energie, die wir als Licht sehen können“ beschrieben. Dies verdeutlicht, zum einen, dass eine Bewertung nach der Nennung von Begriffen nur einen Teil der Antwortleistung berücksichtigen würde und zum anderen es sich bei Konzepten häufig und daher auch im Besonderen bei dem Text zur Entstehung von Polarlichtern um ineinandergreifende Prozesse handelt. Synonyme oder alternative Beschreibungen können so als Komponenten desselben Konzepts kodiert werden. Dieses Vorgehen ermöglicht es, die Vielfalt der Ausdrucksweisen der Lernenden systematisch zu erfassen und die Entwicklung ihrer Konzeptvorstellungen differenziert abzubilden.

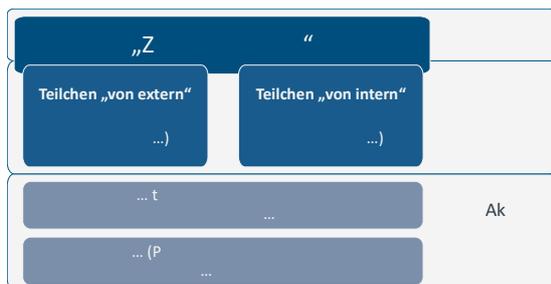


Abb. 1: Beispiel Konzept "Zusammenstoß" (eigene Darstellung)

6.2. Analyse der Fehlkonzepte

Fehlvorstellungen, die in den Antworten der Lernenden auftreten, werden im Rahmen der qualitativen Inhaltsanalyse nach Mayring induktiv codiert. Dabei werden die Kategorien nicht vorab festgelegt, sondern direkt aus dem Material entwickelt, um einen systematischen Überblick über die Vielfalt der Fehlkonzepte zu gewinnen (Mayring, 2022).

Ein Beispiel hierfür ist die Lernendenantwort: „Die Erdatmosphäre verhindert, dass geladene Teilchen oder Sonnenwinde zur Erde durchdringen.“ Im Konzept „Schutz/Ablenkung“ ist die Komponente „Erdatmosphäre“ jedoch falsch, da tatsächlich das Magnetfeld diese Schutzfunktion übernimmt. Solche falschen Zuordnungen werden als Fehlvorstellungen identifiziert und als eigene induktiv gebildete Kategorie erfasst, wodurch die Analyse flexibel auf die tatsächlichen Antworten der Lernenden eingehen kann (Mayring, 2022). So wird die falsche Nennung aufgenommen, aber dennoch kann der richtige Anteil des konzeptionellen Prinzips auf diese Weise kodiert werden.

6.3. Relative Bewertung

Die relative Bewertung der Lernendenantworten erfolgt anhand einer fünfstufigen Likert-Skala, die den Umfang und die inhaltliche Tiefe der Antworten zu den Fragen nach der Rolle der Erdatmosphäre, der Rolle der Sonne sowie der Lokalisation und Begründung der Polarlichter differenziert abbildet.

Die Skala reicht von 0 Punkten für eine falsche Antwort über 1 Punkt für eine unvollständige Antwort oder einen gravierenden Fehler, 2 Punkte für eine unvollständige, aber richtige Antwort oder eine vollständige Antwort mit konzeptionellem Fehler, bis hin zu 3 Punkten für eine vollständige Antwort und 4 Punkten für eine vollständige Antwort mit zusätzlicher, vertiefender Information.

Für das Konzept der Erdatmosphäre entspricht eine vollständige Antwort (3 Punkte) beispielsweise der Aussage: „Die Erdatmosphäre besteht aus (Teil 1) (Gas-) Teilchen. Wenn die Gasteilchen mit den Teilchen der Sonne (Teil 2) zusammenstoßen (Teil 3), [leuchtet es/ Energie wird frei/ entstehen Polarlichter (Zusatzpunkt dann 4 Punkte)].“

Werden nur einzelne Teilkonzepte genannt, erfolgt eine niedrigere Bewertung. Zusätzliche Aspekte (in eckigen Klammern), wie die Erklärung der unterschiedlichen Farben der Polarlichter in Bezug auf die jeweiligen Gasteilchen oder die Verbindung der freiwerdenden Energie mit dem Licht, werden mit der höchsten Punktzahl (4 Punkte) gewürdigt. So

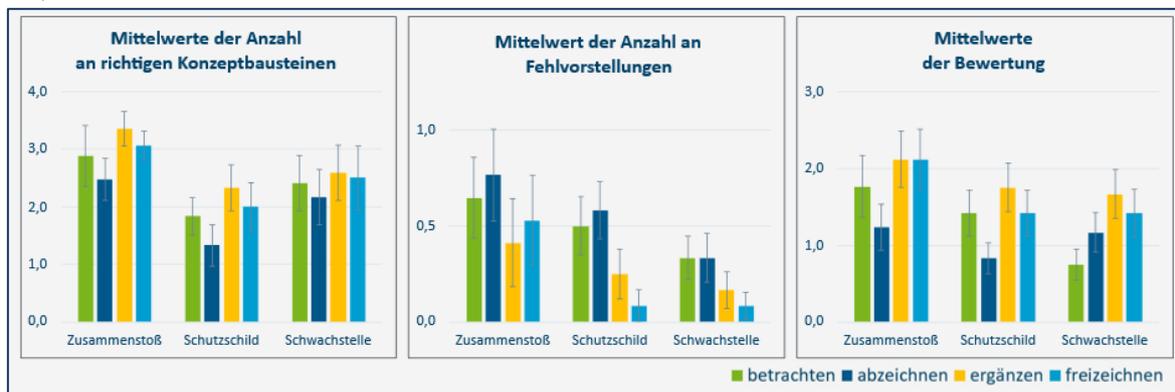


Abb. 2: Ergebnisse der ersten Teilauswertung getrennt nach Mittelwerten für die Anzahl der richtigen Konzeptbausteine (links), Mittelwerte der Anzahl an Fehlvorstellungen (mitte) und Mittelwerte der relativen Bewertung (rechts)

ermöglicht dieses Bewertungssystem eine differenzierte und nachvollziehbare Einschätzung der Antworten hinsichtlich ihrer inhaltlichen Vollständigkeit und konzeptuellen Tiefe.

7. Ergebnisse

Im Rahmen einer ersten Kohorte wurde eine erste Auswertung der Lernendenantworten vorgenommen. Für jede Bewertungsmethode wurden jeweils zwölf Antworten analysiert und anhand der zuvor definierten Auswertungsschritte bewertet. Im Fokus der Auswertung standen die Mittelwerte der drei Bewertungsschritte, um eine Einschätzung der Antwortqualität zu ermöglichen. Die Berechnung der Mittelwerte erfolgte getrennt für jeden Lernenden, wodurch erste Hinweise auf die Verteilung und Streuung der Antwortqualitäten innerhalb der untersuchten Kohorte gewonnen werden konnten.

Die Auswertung der Diagramme (vgl. Abb. 2) zeigt deutliche Unterschiede zwischen den Methoden hinsichtlich der Nennung richtiger Konzeptbausteine beim Konzept der Schwachstelle. Hierbei schneidet das Abzeichnen am schlechtesten ab, während das Ergänzen die besten Ergebnisse erzielt. Dieses Muster bestätigt sich auch bei den Konzepten „Schutzschild“ und „Schwachstelle“, wo ebenfalls beim Ergänzen die meisten Konzeptbausteine in den Antworten genannt werden.

Bezüglich der Anzahl an Fehlvorstellungen ergibt sich beim Konzept der Schwachstelle, dass die meisten Fehlvorstellungen beim Abzeichnen auftreten, während das Ergänzen zu den wenigsten Fehlvorstellungen führt. Bei den Konzepten „Schutzschild“ und „Schwachstelle“ wiederum zeigt sich, dass beim Freizeichnen am wenigsten Fehlvorstellungen auftreten.

Die Mittelwerte der relativen Bewertung der Korrektheit spiegeln diese Tendenzen wider: Die Methoden Ergänzen und Freizeichnen erzielen die höchsten Mittelwerte, während das Abzeichnen auch hier am schlechtesten abschneidet.

Es ist jedoch zu beachten, dass diese Ergebnisse bislang auf einer Teilmenge von jeweils nur zwölf Lernenden-Antworten pro Methode basieren. Daher handelt es sich um erste Tendenzen, die Unterschiede sind statistisch noch nicht signifikant und müssen mit der Auswertung weiterer Antworten überprüft werden.

8. Fazit und Ausblick

Die bisherigen Ergebnisse stellen einen Zwischenstand im laufenden Auswertungsprozess dar. Erste Tendenzen hinsichtlich der Unterschiede zwischen den untersuchten Methoden sind bereits erkennbar, doch ist für belastbare Aussagen die Auswertung weiterer Datensätze notwendig, um die bisherigen Befunde zu verdichten.

Im nächsten Schritt werden alle verfügbaren Datensätze ausgewertet, einschließlich der

Ergebnisse aus Pre-, Post- und Follow Up-Tests, um die Entwicklung und Nachhaltigkeit der Lernmethoden über drei Messzeitpunkte hinweg systematisch zu vergleichen. Darüber hinaus sollen die Daten zu Cognitive Load, zur Selbstwerteinschätzung des Lernerfolgs und zur Time on Task mit den Ergebnissen zum Lernerfolg in Verbindung gesetzt werden. Ergänzend werden potenzielle Korrelationen zu weiteren, parallel erhobenen personenbezogenen Variablen wie Interesse und Kreativität analysiert. Ziel ist es, ein umfassenderes Verständnis der Wirkmechanismen der verschiedenen Lernmethoden und ihrer individuellen Einflussfaktoren zu gewinnen.

9. Literaturverzeichnis

- Ainsworth, S. (2006). DeFT: A conceptual framework for considering learning with multiple representations. *Learning and Instruction*, 16(3), 183–198.
- Ainsworth, S., Prain, V. & Tytler, R. (2011). Science education. Drawing to learn in science. *Science (New York, N.Y.)*, 333(6046), 1096–1097. <https://doi.org/10.1126/science.1204153>
- Ainsworth, S. E. & Scheiter, K. (2021). Learning by Drawing Visual Representations: Potential, Purposes, and Practical Implications. *Current Directions in Psychological Science*, 30(1), 61–67. <https://doi.org/10.1177/0963721420979582>
- Boldini, A., Russo, R., Punia, S. & Avons, S. E. (2007). Reversing the picture superiority effect: a speed-accuracy trade-off study of recognition memory. *Memory & Cognition*, 35(1), 113–123. <https://doi.org/10.3758/BF03195948>
- Clark, J. M., & Paivio, A. (1991). Dual coding theory and education. *Educational Psychology Review*, 3(3), 149–210. <https://doi.org/10.1007/BF01320076>
- Cooper, G., Tindall-Ford, S., Chandler, P. & Sweller, J [J.] (2001). Learning by imagining. *Journal of experimental psychology. Applied*, 7(1), 68–82. <https://doi.org/10.1037//1076-898x.7.1.68>
- Fernandes, M. A., Wammes, J. D. & Meade, M. E. (2018). The Surprisingly Powerful Influence of Drawing on Memory. *Current Directions in Psychological Science*, 27(5), 302–308. <https://doi.org/10.1177/0963721418755385>
- Fiorella, L. & Zhang, Q. (2018). Drawing Boundary Conditions for Learning by Drawing. *Educational Psychology Review*, 30(3), 1115–1137. <https://doi.org/10.1007/s10648-018-9444-8>
- Kollmer, J., Schleinschock, G., Scheiter, K. & Eitel, A. (2020). Is drawing after learning effective for metacognitive monitoring only? *Learning and Instruction*, 66, 101296.
- Leopold, C. (2009). Lernstrategien und Textverstehen: Spontaner Einsatz und Förderung von Lernstrategien. Münster: Waxmann.

- Leutner, D., Leopold, C., & Schmeck, A. (2009). Learning by Drawing: Evidence for Generative Learning in the Classroom. *Zeitschrift für Pädagogische Psychologie*, 23(2), 121–129.
- Leopold, C. & Leutner, D. (2012). Science text comprehension: Drawing, main idea selection, and summarizing as learning strategies. *Learning and Instruction*, 22(1), 16–26.
- Lesgold, A. M., De Good, H., & Levin, J. R. (1977). Pictures and Young children's Prose Learning: A Supplementary Report. *Journal of Reading Behavior*, 9(4), 353–360. <https://doi.org/10.1080/10862967709547240>
- Lesgold, A. M., Levin, J. R., Shimron, J., & Guttmann, J. (1975). Pictures and young children's learning from oral prose. *Journal of Educational Psychology*, 67(5), 636–642. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.67.5.636>
- Leopold, C., & Leutner, D. (2002). Selbstreguliertes Lernen beim Wissenserwerb aus Texten: Förderung durch Strategietraining. *Zeitschrift für Pädagogische Psychologie*, 16(3/4), 163–172.
- Leutner, D., Leopold, C., & Sumfleth, E. (2009). Cognitive load and science text comprehension: Effects of drawing and mentally imagining text content. *Computers in Human Behavior*, 25(2), 284–289.
- Leutner, D., & Opfermann, M. (2013). Drawing to learn: Ein Überblick über den aktuellen Forschungsstand. *Unterrichtswissenschaft*, 41(2), 91–104.
- Lin, L., Lee, C. H., Kalyuga, S., Wang, Y., Guan, S. & Wu, H. (2017). The Effect of Learner-Generated Drawing and Imagination in Comprehending a Science Text. *The Journal of Experimental Education*, 85(1), 142–154. <https://doi.org/10.1080/00220973.2016.1143796>
- Mayer, R. E. (2001). *Multimedia learning*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139164603>
- Mayer, R. E. (2009). *Multimedia learning* (2nd ed.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511811678>
- Mayer, R. E. (2014). *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning*. Cambridge University Press.
- Mayring, P. (2022). *Qualitative Inhaltsanalyse: Grundlagen und Techniken* (13. Aufl.). Beltz.
- Paivio, A. (1990). *Mental Representations: A Dual Coding Approach*. Oxford University Press Incorporated. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/978019506661.001.0001>
- Rheinberg, F. (2000). *Motivation*. Stuttgart: Kohlhammer.
- Schmeck, A., Opfermann, M., van Gog, T., Paas, F., & Leutner, D. (2014). Measuring cognitive load with subjective rating scales during problem solving: Differences between immediate and delayed ratings. *Instructional Science*, 43, 93–114. <https://doi.org/10.1007/s11251-014-9328-3>
- Schmeck, A., Mayer, R. E., Opfermann, M., Pfeiffer, V. & Leutner, D. (2014). Drawing pictures during learning from scientific text: testing the generative drawing effect and the prognostic drawing effect. *Contemporary Educational Psychology*, 39(4), 275–286. <https://doi.org/10.1016/j.cedpsych.2014.07.003>
- Schnotz, W. (2002). Towards an integrated view of learning from text and visual displays. *Educational Psychology Review*, 14(1), 101–120. <https://doi.org/10.1023/A:1013136727916>
- Schnotz, W. (2014). Integrated model of text and picture comprehension. In R. E. Mayer (Ed.), *The Cambridge handbook of multimedia learning* (2nd ed., pp. 72–103). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139547369.006>
- Schwamborn, A., Thillmann, H., Leopold, C., & Leutner, D. (2010). Der Einsatz von vorgegebenen und selbstgenerierten Bildern als Textverstehenshilfe beim Lernen aus einem naturwissenschaftlichen Sachtext. *Unterrichtswissenschaft*, 38(2), 111–132. <https://doi.org/10.1024/1010-0652/a000018>
- van Meter, P. (2001). Drawing construction as a strategy for learning from text. *Journal of Educational Psychology*, 93(1), 129–140. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.93.1.129>
- van Meter, P., & Garner, J. K. (2005). The promise and practice of learner-generated drawing: Literature review and synthesis. *Educational Psychology Review*, 17(4), 285–325. <https://doi.org/10.1007/s10648-005-8136-3>
- van Meter, P., Aleksic, M., Schwartz, A., & Garner, J. (2006). Learner-generated drawing as a strategy for learning from content area text. *Contemporary Educational Psychology*, 31(2), 142–166. <https://doi.org/10.1016/j.cedpsych.2005.04.001>
- van Meter, P. & Firetto, C. M. (Hrsg.). (2013). *Cognitive model of drawing construction: Learning through the construction of drawings*. IAP Information Age Publishing. <https://psycnet.apa.org/record/2014-01969-010>
- Zimmerman, B. J., & Schunk, D. H. (2001). *Self-regulated learning and academic achievement: Theoretical perspectives* (2nd ed.). Lawrence Erlbaum Associates.

Auswirkungen eines MINT-Projekts auf die Motivation und die Selbstwirksamkeit

Tessa Horenburger, Dina Al-Kharabsheh, Anne Geese

Technische Universität Braunschweig, IFdN, Abt. Physik und Physikdidaktik, Bienroder Weg 82, 38106 Braunschweig

tessa.horenburger@tu-braunschweig.de

Kurzfassung

Der Frauenanteil im MINT-Bereich ist noch immer gering. Das Projekt changING regio, das vom Exzellenzcluster SE²A an der Technischen Universität Braunschweig im Bereich der Gleichstellung gefördert wird, will diesem Defizit entgegenwirken. Schülerinnen der 11. und 12. Klasse aus Niedersachsen gewinnen dabei einen Einblick in die Arbeit von Wissenschaftler:innen, lernen weibliche Vorbilder kennen und reflektieren ihre berufliche Orientierung, für den MINT-Bereich. Nach wöchentlichen Videokonferenzen zur inhaltlichen Vorbereitung fanden fünf Präsenztage mit Institutsbesuchen und Hands-on-Experimenten in Braunschweig statt. Die Ergebnisse der Auswirkungen auf die Selbstwirksamkeit, die Motivation und das Interesse wurden durch Mixed-Methods ausgewertet. Es zeigten sich positive motivationale und selbstwirksamkeitsfördernde Ergebnisse.

1. Einleitung

Der Frauenanteil in der Studienfachgruppe MINT in Deutschland ist von 28,8 % im Jahr 2013 auf 32,6 % im Jahr 2023 gestiegen (MINT-DataLab von MINT-verbunden, 2024). Allerdings bilden sie weiterhin einen geringen Anteil. Der Bedarf an Fachkräften ist nicht gedeckt und diese MINT-Lücke wird in den kommenden Jahren noch weiter steigen, wobei gleichzeitig durch den Klimawandel und die Digitalisierung viele Fachkräfte benötigt werden (Anger, Betz & Plünnecke, 2024).

Um diese Lücke zu schließen, fördert u.a. das Bundesministerium für Bildung und Forschung Projekte zur Stärkung der Selbstwirksamkeit von Mädchen und zur Studienwahlentscheidung in Richtung MINT (Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt, 2021).

Auch Forschungsprogramme wie die Exzellenzcluster nehmen ihre Verantwortung wahr und stellen im Bereich der Gleichstellung Mittel zur Verfügung, um Mädchen für MINT-Studiengänge zu begeistern. So wird am Exzellenzcluster SE²A (Sustainable and Energy-Efficient Aviation) seit 2019 der Forschungsclub changING für Braunschweiger Schüler:innen durchgeführt, der in Form von regelmäßigen Treffen einen Einblick in die beteiligten Institute sowie das Arbeiten an eigenen Technikprojekten anbietet (Al-Kharabsheh et al., 2002). Zusätzlich ermöglichte das hybride Projekt changING regio im Jahr 2024 jungen Frauen aus Niedersachsen Kontakte zu weiblichen Wissenschaftlerinnen und, durch die kostenfreie und landesweite Teilnahme, Zugang zu außerschulischer MINT-Bildung.

Die Wirksamkeit des Projektes changING regio bewerten wir hier anhand folgender Forschungsfragen: Welche Auswirkungen hat das Projekt changING regio auf die Motivation, das Interesse und die Selbstwirksamkeit von Schülerinnen der 11. und 12. Klasse

aus Niedersachsen in Bezug auf MINT? (FF1). Inwiefern unterscheiden sich die Teilnehmerinnen von den Schülerinnen einer Kontrollgruppe hinsichtlich der Motivation, des Interesses und der Selbstwirksamkeit in Bezug auf MINT? (FF2).

2. Theoretische Einordnung

Die pädagogische Psychologie kennt verschiedene Modelle und Theorien, zur Beschreibung der Motivation, darunter das Konzept der Selbstbestimmung nach Deci und Ryan (1993). Dabei resultiert die größtmögliche Leistung aus Handlungen, die durch verinnerlichte äußere Werte oder durch Interessen motiviert sind. Sie dient zudem dazu, Bedürfnisse wie Autonomie, Verbundenheit und Kompetenz zu erfüllen. Im Selbstbestimmungsmodell wird – im Vergleich zu anderen Modellen – berücksichtigt, was für ein Individuum zu einem konkreten Zeitpunkt und in bestimmten Kontexten motivierend ist. (Wasserman & Wasserman, 2024)

Nach der Erwartungs-Wert-Theorie von Parijat und Bagga (2014) hängt die Stärke einer Tendenz, auf eine bestimmte Weise zu handeln, von der Stärke der Erwartung ab, dass durch die Handlung ein gewisses Ergebnis folgt. Es wird dabei in zwei Faktoren unterschieden: die Erfolgserwartung und die Wertkomponente. Diese Theorie basiert auf der Leistungsmotivation nach Atkinson, bei der Leistung als Motiv beschrieben wird. Dabei wird in zwei Tendenzen unterschieden: Erfolge anstreben und Misserfolge vermeiden. Das Misserfolgsmotiv hemmt dabei die Stärke des Erfolgsmotivs. (ebd., Brunstein & Heckhausen, 2018)

Bei der sozial-kognitiven Theorie stehen die Selbstwirksamkeit und die Verbesserung des Selbst im Vordergrund. Darüber hinaus beschreibt sie den Wert als einen zentralen „Treiber motivierten Handelns“ (Wasserman & Wasserman, 2024). (ebd.)

Die Selbstwirksamkeit kann mit Erwartungen an Ergebnisse von Handlungen, aber auch mit Selbstwirksamkeitsüberzeugungen zusammenhängen. Der Glaube an die eigenen Fähigkeiten kann zum Glauben an ein bestimmtes Ergebnis führen. Nach Bandura wird die Selbstwirksamkeit durch vier Quellen beeinflusst. Die erste Quelle bilden Handlungsergebnisse durch persönliche Erfolge oder Misserfolge. Erfolgreiche Erfahrungen sind dabei die effektivste Maßnahme zur Stärkung der Selbstwirksamkeit. Die Lernenden müssen dabei ihren Erfolg ihrer Anstrengung und ihren Fähigkeiten zuschreiben. (Schwarzer & Jerusalem, 2002)

Das Beobachten von Verhaltensmodellen, welche eine stellvertretende Erfahrung darstellen, ist eine weitere Möglichkeit, die Selbstwirksamkeit zu fördern. Vorbilder, die den Lernenden ähnlich sind, erzielen dabei eine besonders wirksame Förderung. Berichte der Vorbilder über deren Probleme und Herangehensweisen sind ebenfalls sehr effektiv. Die dritte Quelle ist die glaubwürdige verbale Unterstützung von anderen. Zudem hat die Wahrnehmung der eigenen Gefühle einen Einfluss auf die Selbstwirksamkeit. Dabei ist entscheidend, wie diese gedeutet werden. Wird beispielsweise große Aufregung als fehlende Kompetenz angesehen, so erscheint der Erfolg geringer. (ebd.)

3. Projektablauf

Der hybride Forschungsclub changING regio fand im Frühjahr 2024 statt. Über bestehende Kontakte an Gymnasien in Niedersachsen und über Social-Media-Kanäle wurde über das Projekt informiert. Vor Beginn des Projektes wurde den Schülerinnen eine Mitmach-Kiste zugeschiedt. Darin befanden sich Anleitungen für Experimente, die sie als Vorbereitung der Online-Termine durchführen sollten, aber auch Bauteile, auf die später eingegangen wurde. Im Zeitrahen vom 06.02. bis 09.04.2024 fanden wöchentlich Online-Veranstaltungen statt, die von wissenschaftlichen Mitarbeiter:innen zum Thema nachhaltige Luftfahrt aufbereitet wurden. Sie sollten die Schülerinnen inhaltlich auf die Besuche in den Instituten vorbereiten. So wurde beispielsweise vom Institut für Flugzeugbau und Leichtbau erklärt, was Leichtbau ist und wo dieser im Alltag zu finden ist. Zudem wurde wöchentlich auf grundlegendem Niveau programmiert, denn die Teilnehmerinnen hatten einen Einplatinencomputer mit einer Fahrzeuergewerterung in der Mitmach-Kiste. Im Anschluss an das Onlineformat folgte der fünftägige Aufenthalt in Braunschweig, bei dem sie Experimente durchführen konnten und die wissenschaftlichen Mitarbeiter:innen persönlich kennengelernt haben. Sie haben unter anderem beim Institut für Flugführung die Möglichkeit bekommen, einen Flugsimulator zu fliegen (siehe Abb. 1), und beim Institut für Strömungsmechanik haben sie verschiedene Flügelprofile im Windkanal testen können (siehe Abb. 2). Es gab darüber hinaus einen von einer Psychologin geleiteten Workshop, bei dem sich die

Teilnehmerinnen mit ihren Stärken und ihren berufsbezogenen Werten auseinandergesetzt haben. Am Abschlussabend folgte ein Rennen als Challenge mit den selbst programmierten Fahrzeugen.



Abb. 1: Fliegen des Flugsimulators beim Institut für Flugführung (Veröffentlichungsgenehmigung Institut für Flugführung)



Abb. 2: Experiment am Windkanal beim Institut für Strömungsmechanik (Veröffentlichungsgenehmigung Institut für Strömungsmechanik)

4. Methodik

Vor Beginn des Projektes füllten 16 Teilnehmerinnen und neun Schülerinnen der Kontrollgruppe einen Fragebogen digital aus. Selbiger wurde von beiden Gruppen nach dem Aufenthalt in Braunschweig bearbeitet. Zwei Monate nach der Durchführung des Projektes nahmen elf Teilnehmerinnen an einem Follow-up-Fragebogen teil. Die Fragebögen erheben die sozioökonomischen Daten der Schülerinnen, Vorerfahrungen mit außerschulischen Projekten, die Studien- und Berufswahl; sowie die aktuelle Motivation durch den FAM-Fragebogen, welcher sich in die Faktoren Interesse, Erfolgswahrscheinlichkeit, Misserfolgsbefürchtung und Herausforderung gliedert (Rheinberg, Vollmeyer & Burns, 2001). Die Antworten wurden mit SPSS statistisch ausgewertet. Die Stichprobe reichte für einen T-Test nicht aus, daher wurden die Ergebnisse anhand des Mittelwerts, mithilfe von Boxplots, der Verteilung der Antworten sowie einzelner besonderer Fälle beschrieben und interpretiert.

Während der vor Ort stattfindenden Termine wurden Beobachtungen gemacht, die ergänzend zu den Ergebnissen angeführt wurden. Dabei haben die Organisatorinnen die Schülerinnen untereinander aufgeteilt und anhand eines Beobachtungsbogens Notizen gemacht.

Am letzten Abend in Braunschweig wurden zudem mit den Teilnehmerinnen leitfadengestützte Interviews geführt. Das Interview umfasste hauptsächlich

Fragen zu den Quellen der Selbstwirksamkeit nach Bandura, um die Entwicklungen der Teilnehmerinnen genauer zu verstehen. Darüber hinaus wurden Fragen zum Projekt gestellt, die durch die Beobachtungen aufgekomen sind. Die Interviews wurden mit MAXQDA transkribiert und nach der qualitativen Inhaltsanalyse nach Mayring ausgewertet.

5. Ergebnisse

5.1. Ergebnisse des Fragebogens

Im Fragebogen konnten die einzelnen Fragen auf einer Likert-Skala von eins bis sieben beantwortet werden, wobei eins bedeutet, dass die Aussagen auf die Schülerinnen nicht zutreffen, und sieben bedeutet, dass sie zutreffen.

Zu den vier Faktoren des FAM-Fragebogens wurden die Mittelwerte der vier bzw. fünf Fragen gebildet. Diese wurden dann in Abbildung 3 für die Schülerinnen der Kontrollgruppe und der Teilnehmerinnen (Regio) vor der Durchführung des Projektes in Boxplots dargestellt. In Abbildung 4 werden die Mittelwerte nach der Durchführung des Projektes dargestellt.

Bei der Kontrollgruppe liegen die Werte des Interesses im Mittel bei $MW_{KI1} = 3.96 \pm 1.40$ und nach der Durchführung bei $MW_{KI2} = 4.20 \pm 1.77$. Der Median liegt vorher bei $Med_{KI1} = 4.20$ und hinterher bei $Med_{KI2} = 4.60$ (siehe Abb. 3, 4). Die Mittelwerte des Interesses der Teilnehmerinnen liegen vor dem Projektbeginn hoch ($MW_{RI1} = 5.53 \pm 1.09$; $Med_{RI1} = 5.60$), nach der Durchführung ebenfalls ($MW_{RI2} = 5.41 \pm 1.06$; $Med_{RI2} = 5.50$). Auch in der Spannweite unterscheiden sich die Mittelwerte nur gering (siehe Abb. 3, 4). Die Verteilungen unterscheiden sich vorher und nachher nur geringfügig, jedoch sind die Werte der Teilnehmerinnen höher als die der Kontrollgruppe.

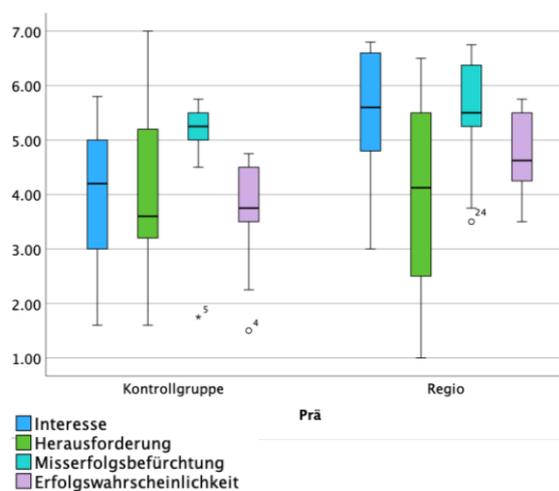


Abb. 3: Mittelwerte der einzelnen Faktoren des FAM-Fragebogens im Gruppenvergleich vor der Durchführung des Projektes (eigene Darstellung in SPSS)

Die Werte der Herausforderung liegen bei der Kontrollgruppe vorher bei $MW_{KH1} = 4.90 \pm 1.24$; $Med_{KH1} = 5.25$. Zum Zeitpunkt nach dem Projekt liegen die Werte bei $MW_{KH2} = 5.03 \pm 1.19$; $Med_{KH2} = 5.00$. Die Werte der Teilnehmerinnen liegen vorher im Mittel bei $MW_{RH1} = 5.53 \pm .99$; $Med_{RH1} = 5.50$ (siehe Abb. 3). Nach dem Projekt sind die Werte geringfügig gesunken und liegen bei $MW_{RH2} = 4.89 \pm 1.00$; $Med_{RH2} = 4.88$ (siehe Abb. 4). Damit liegen die Werte der Herausforderung zu Beginn bei den Teilnehmerinnen etwas höher als bei den Schülerinnen der Kontrollgruppe. Nach der Projektdurchführung sinken die Werte der Teilnehmerinnen.

Die Misserfolgsbefürchtung liegt bei der Kontrollgruppe zu Beginn bei $MW_{KM1} = 4.13 \pm 1.62$; $Med_{KM1} = 3.60$. Nach dem Zeitraum liegen die Werte bei $MW_{KM2} = 3.91 \pm 1.31$; $Med_{KM2} = 3.40$. Bei den Teilnehmerinnen liegt sie vorher im Mittel bei $MW_{RM1} = 4.06 \pm 1.71$; $Med_{RM1} = 4.13$ und nach der Durchführung des Projektes bei $MW_{RM2} = 2.69 \pm 1.18$; $Med_{RM2} = 2.30$ (siehe Abb. 3, 4). Zu Beginn sind die Werte beider Gruppen ähnlich. Sie nehmen jedoch, anders als bei den Schülerinnen, bei den Teilnehmerinnen nach dem Projekt deutlich ab.

Die Mittelwerte der Erfolgswahrscheinlichkeit liegen bei den Schülerinnen der Kontrollgruppe vorher bei $MW_{KE1} = 3.61 \pm 1.10$; $Med_{KE1} = 3.75$. Nach dem Zeitraum liegen sie bei $MW_{KE2} = 3.86 \pm 1.39$; $Med_{KE2} = 4.00$ (siehe Abb. 3, 4). Bei den Teilnehmerinnen liegt sie zu Beginn bei $MW_{RE1} = 4.77 \pm .85$; $Med_{RE1} = 4.63$. Nach der Projektdurchführung liegen sie im Mittel bei $MW_{RE2} = 5.92 \pm .77$; $Med_{RE2} = 6.25$ (siehe Abb. 3, 4). Die Werte der Teilnehmerinnen steigen, bei den Schülerinnen der Kontrollgruppe bleiben sie nahezu gleich. Zu Beginn sind die Werte der Teilnehmerinnen minimal größer als die der Kontrollgruppe.

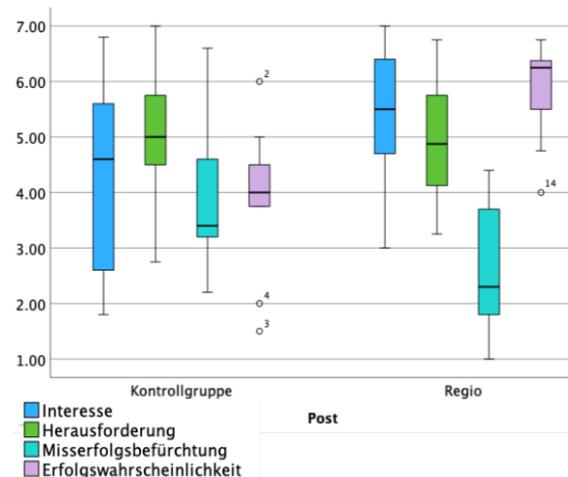


Abb. 4: Mittelwerte der einzelnen Faktoren des FAM-Fragebogens im Gruppenvergleich nach der Durchführung des Projektes (eigene Darstellung in SPSS)

Den Follow-up-Fragebogen haben nur noch elf Teilnehmerinnen ausgefüllt. Aufgrund dessen hat sich die Verteilung der Mittelwerte etwas verändert. Es wird an dieser Stelle hauptsächlich auf den Vergleich mit den vorherigen Werten eingegangen.

Die Werte des Interesses haben sich bei den drei Messzeitpunkten nicht wesentlich verändert. Auch die Mittelwerte der Herausforderung und der Misserfolgsbefürchtung liegen weiterhin auf einem ähnlich niedrigen Niveau wie zum zweiten Messzeitpunkt. Die Werte der Erfolgswahrscheinlichkeit sind beim Follow-up im Vergleich zum Zeitpunkt nach dem Projekt ebenfalls etwa gleichgeblieben. Sie liegen weiterhin höher als zu Beginn.

5.2. Ergebnisse der Interviews

In den Interviews wurden Fragen zu den vier Quellen der Selbstwirksamkeit nach Bandura gestellt. Zu Beginn wurden die Teilnehmerinnen gefragt, bei welchen Aktivitäten sie das Gefühl hatten, diese gut bewältigt zu haben. Dabei wurden viele praktische Aufgaben wie der Flugsimulator und die Challenge mit dem Fahrzeug mehrfach aufgezählt. Fast alle Teilnehmerinnen beschrieben, dass die Erfolgserlebnisse ihre Selbstwirksamkeit gestärkt haben, und, dass sie auf sich stolz sind.

Sie wurden zudem gefragt, ob sie beobachten konnten, wie andere Erfolge erzielt haben und wie sie dies beeinflusst hat. Sie haben die wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen, die Mentorinnen und die anderen Teilnehmerinnen genannt, bei denen sie Erfolge beobachten konnten oder durch die persönlichen Erfahrungsberichte inspiriert wurden. Sie haben sich zudem gegenseitig unterstützt. Darüber hinaus äußerten sie, dass sie motiviert waren und an sich geglaubt haben.

Hinsichtlich der verbalen Überzeugung wurden die Teilnehmerinnen gefragt, ob sie von anderen ermutigt und in ihren Fähigkeiten bestärkt wurden und wie sich diese aufmunternden Worte auf ihr Selbstvertrauen ausgewirkt haben. Viele äußerten dazu, dass das Programm, die positive Stimmung und die Hilfestellungen viel dazu beigetragen haben, dass sie bestärkt wurden. Die aufmunternden Worte haben sie positiv beeinflusst. Eine Schülerin sagte beispielsweise, dass sie das Projekt ganz anders als den Schulalltag erlebt hat, denn in der Schule wurde ihr noch nie direkt gesagt, dass sie etwas schaffen kann.

Zuletzt wurde nach den Gefühlen der Teilnehmerinnen gefragt und danach, wie sie damit umgegangen sind. Viele äußerten, dass sie vor Beginn des Projektes Angst hatten und vor manchen Aufgaben aufgeregt und nervös waren. Nach der Durchführung empfanden sie Freude und Stolz, was sich positiv ausgewirkt hat. Manche haben mit den anderen über ihre Gefühle gesprochen.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Die Antworten des FAM-Fragebogens zeigen, dass das Interesse der Teilnehmerinnen größer ist als das

der Schülerinnen der Kontrollgruppe. Die Werte des Interesses konnten bei den Teilnehmerinnen durch das Projekt nicht weiter gesteigert werden. Die Betrachtung individueller Fälle hat jedoch gezeigt, dass es bei einigen individuell gesteigert werden konnte.

Die Werte der Herausforderung und der Misserfolgsbefürchtung sind bei den Teilnehmerinnen durch das Projekt gesunken. Zudem waren die Werte bei den Teilnehmerinnen zu Beginn größer als die der Schülerinnen der Kontrollgruppe. Die Werte der Erfolgswahrscheinlichkeit hingegen lagen zu Beginn bei den Teilnehmerinnen über denen der Schülerinnen und konnten durch das Projekt noch weiter erhöht werden.

Die Antworten des Follow-up-Fragebogens zeigen, dass die Ergebnisse auch langfristig wirken. So liegen die Werte der Erfolgswahrscheinlichkeit der Teilnehmerinnen nach zwei Monaten weiterhin im selben Bereich und auch die Werte der Misserfolgsbefürchtung sind weiterhin gering.

In den Interviews wurden die Aufgaben des Projektes als herausfordernd, aber überwindbar wahrgenommen. Außerdem wurde der fehlende Leistungsdruck oft als motivierend empfunden. Besonders die praktischen Anteile – wie der Besuch des Flugsimulators – wurden häufig genannt und als interessant beschrieben. In den Beobachtungen wurde deutlich, dass alle Teilnehmerinnen engagiert mitgearbeitet und Nachfragen gestellt haben.

Die Antworten auf die Fragen zu den Quellen der Selbstwirksamkeit zeigen, dass die Teilnehmerinnen viele Erfolgsmomente erleben konnten. Dabei wurden die praktischen Anteile an den Instituten – wie etwa der Flugsimulator – am häufigsten genannt. Sie konnten zudem stellvertretende Erfahrungen machen, da sie in Gruppen mit den anderen Teilnehmerinnen gearbeitet haben und diese beobachten konnten. Die weiblichen wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen wurden dabei als Vorbilder genannt. Es konnten demnach Frauen in der Wissenschaft sichtbar gemacht werden. Die Teilnehmerinnen haben sich gegenseitig stark unterstützt und hatten eine sehr gute Gruppendynamik. Die positive Stimmung innerhalb der Gruppe und die Hilfeleistungen der wissenschaftlichen Mitarbeitenden, aber auch der Teilnehmerinnen unter sich, förderten die dritte Quelle, die verbale Überzeugung. Vor Beginn des Projektes und bei Experimenten fühlten sich die Teilnehmerinnen angespannt und nervös. Jedoch empfanden sie Freude und Stolz, wenn sie den Herausforderungen des Experimentes gewachsen waren, sodass auch die vierte Quelle der Selbstwirksamkeit angesprochen wurde.

Darüber hinaus gab es viele positive Rückmeldungen zu den Programmieraufgaben mit dem Einplatinencomputer und der Challenge mit dem Fahrzeug. Die Antworten im Interview und im Fragebogen zeigen, dass dieser praktische Teil ebenfalls positive Auswirkungen auf die Selbstwirksamkeit der Teilnehmerinnen hatte. Sie konnten im Team zusammenarbeiten

und weitere Erfolgsmomente erleben. Die Aufgaben fanden einige herausfordernd, aber überwindbar.

Zur Beantwortung der ersten Forschungsfrage (FF1) lässt sich sagen, dass das Projekt positive motivationale Auswirkungen auf die Teilnehmerinnen hatte, das Interesse gefestigt und die Selbstwirksamkeit gestärkt werden konnten.

Die zweite Forschungsfrage (FF2) kann dahingehend beantwortet werden, dass die Schülerinnen der Kontrollgruppe ein geringeres Interesse an MINT und eine geringere Erfolgswahrscheinlichkeit als die Teilnehmerinnen haben. Die Selbstwirksamkeit ist zudem bei den Teilnehmerinnen größer.

Abschließend lässt sich zusammenfassen, dass das Projekt changING regio zur Förderung der Motivation und der Selbstwirksamkeit bei den Schülerinnen beigetragen hat. Aufgrund der positiven Erfahrungen auch mit dem hybriden Ablauf wird es ein Projekt mit einem ähnlichen organisatorischen Ablauf geben: Role2Role. Der erste Durchgang des vom BMFTR geförderten Verbundprojektes wird in den niedersächsischen Herbstferien 2025 stattfinden.

7. Literatur

- Al-Kharabsheh, D., Geese, A. & Müller, R. (2002): Der Aufbau des Forschungsclubs changING: ingenieurdidaktisches Konzept auf Basis der Interessens- und Selbstwirksamkeit, in die 16. Ingenieurpädagogische Jahrestagung 2022, Technische Bildung für eine nachhaltige Entwicklung.
- Anger, C., Betz, J. & Plünnecke, A. (07.05.2024): MINT-Frühjahrsreport 2024. Abrufbar unter: <https://www.iwkoeln.de/studien/christina-anger-julia-betz-axel-pluennecke-herausforderungen-der-transformation-meistern-mint-bildung-staerken.html> [06.05.2025].
- Bandura, A. (1977). Self-efficacy: Toward a unifying theory of behavioral change. *Psychological Review*, 84(2), 191–215.
- Brunstein, J. C. & Heckhausen, H. (2018): Leisungsmotivation. In Heckhausen, J. & Heckhausen, H. (Hrsg.), *Motivation und Handeln*. (S. 163-222). Berlin: Springer-Verlag.
- Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (12.07.2021): Bekanntmachung über die Förderung von Maßnahmen zur Stärkung von MINT-Kompetenzen bei Kindern, Jugendlichen und jungen Erwachsenen. Abrufbar unter: <https://www.bmfr.bund.de/SharedDocs/Bekanntmachungen/DE/2021/08/2021-08-19-Bekanntmachung-Mint.html> [24.07.2025].
- Deci, L. E. & Ryan, R. M. (1993): Die Selbstbestimmungstheorie der Motivation und ihre Bedeutung für die Pädagogik. *Zeitschrift für Pädagogik*, 39. Reihe, (S. 223-238) Beltz Verlag. Abrufbar unter: https://www.pedocs.de/volltexte/2017/11173/pdf/ZfPaed_1993_2_Deci_Ryan_Die_Selbstbestimmungstheorie_der_Motivation.pdf [29.04.2025].
- MINT-DataLab von MINTvernetzt: Frauenanteil in der Studienfachgruppe MINT in Deutschland. Quelle der Daten: Destatis, 2024, auf Anfrage und eigene Berechnung durch MINTvernetzt. Abrufbar unter: https://mint-vernetzt.shinyapps.io/datalab/#studium_frauen [27.05.2025].
- Parijat, P., & Bagga, S. (2014). Victor Vroom's expectancy theory of motivation – An evaluation. *International Research Journal of Business Management*, VII(9), 1–8.
- Rheinberg, F., Vollmeyer, R. & Burns, B. D. (2001): FAM: Ein Fragebogen zur Erfassung aktueller Motivation in Lern- und Leistungssituationen (Langversion, 2001). Abrufbar unter: https://www.researchgate.net/publication/247398603_FAM_Ein_Fragebogen_zur_Erfassung_aktueller_Motivation_in_Lern_und_Leistungssituationen [06.05.2025].
- Schwarzer, R. & Jerusalem, M. (2002). Das Konzept der Selbstwirksamkeit. In M. Jerusalem & D. Hopf (Hrsg.), *Selbstwirksamkeit und Motivationsprozesse in Bildungsinstitutionen*. *Zeitschrift für Pädagogik*, 44. Beiheft, (S. 28-53) Weinheim und Basel: Beltz Verlag. Abrufbar unter: https://www.pedocs.de/volltexte/2011/3930/pdf/ZfPaed_44_Beiheft_Schwarzer_Jerusalem_Konzept_der_Selbstwirksamkeit_D_A.pdf [06.05.2025].
- Wasserman, T. & Wasserman, L. (2024): *Motivation, Anstrengung und das Modell des neuronalen Netzes*. Cham: Springer Nature Switzerland AG.

Das Interesse von Schülerinnen und Schülern an physikalischen Themen

- Erste Ergebnisse einer Fragebogenerhebung -

Hermann Lidberg*, Roger Erb*

*Goethe-Universität Frankfurt am Main, Institut für Didaktik der Physik,
Max-von-Laue-Straße 1, 60438 Frankfurt am Main
lidberg@physik.uni-frankfurt.de

Kurzfassung

Welche naturwissenschaftlichen Kontexte von Jugendlichen als interessant angesehen werden wurde in großangelegten quantitativen Studien wie der IPN-Interessensstudie (1998) und der internationalen ROSE-Studie (2010, 2019) systematisch untersucht. In einer Folgestudie von Zöchling (2023) wurde gezeigt, dass Kontexte in einer Hierarchie von mehreren Stufen kategorisiert werden können: Kontexte wie „der eigene Körper“ sowie sozialwissenschaftliche und grundlegende Fragestellungen der Menschheit, werden vom überwiegenden Teil der Jugendlichen als interessant angesehen, während Kontexte mit Bezug zu Wissenschaft und Technik weniger gut abschneiden. Dies deutet darauf hin, dass physikalische Inhalte von Jugendlichen nur dann als interessant bewertet werden, wenn sie in spezifischen, als relevant wahrgenommenen Kontexten eingebettet sind.

Um die Ursachen zu ermitteln, warum bestimmte Kontexte von Jugendlichen als interessant wahrgenommen werden und welche sozialen, persönlichen und gesellschaftlichen Faktoren dabei für sie von Bedeutung sind, wurde von uns auf Basis von Interviews mit Jugendlichen ein Fragebogen entwickelt. Mit diesem soll erfasst werden, wann, wie und in welchen Kontexten Interessen von Jugendlichen entstehen und wie sich Jugendliche mit ihren Interessen beschäftigen. Außerdem wird untersucht, ob es Unterschiede zwischen Themen gibt, die Jugendliche im Allgemeinen interessieren und physikalischen Themen, die die Jugendlichen als interessant ansehen.

Im Rahmen des Beitrags werden sowohl die Entwicklung des Fragebogens als auch erste deskriptive Ergebnisse vorgestellt.

1. Interesse beim Lernen und in der Schule

Die Interessen von Schüler*innen sind zentraler Gegenstand unterschiedlicher wissenschaftlicher Untersuchungen. Mehrere Studien konnten bereits zeigen, dass Interesse positive Effekte auf das Lernen hat und mutmaßlich eng mit diesem verwoben ist. Zu diesen positiven Effekten zählen die Verbesserung der schulischen Leistung (M. Jansen et al., 2016), Verbesserungen der Leistung in standardisierten Leistungstests (Köller et al., 2001; Marsh et al., 2005; Ozel et al., 2012), die Verbesserung der Wissensstruktur (U. Schiefele, 1998; Benware et al., 1984) und die Steigerung der Lesekompetenz (Retelsdorf et al., 2011), jeweils in den Themen- und Inhaltsbereichen, an denen die Schüler*innen interessiert sind.

Ein erhöhtes Interesse an Schulfächern und deren Inhalten ist demnach wünschenswert und kann als explizites Ziel des naturwissenschaftlichen Unterrichts betrachtet werden. Durch groß angelegte Interessensstudien wie die IPN-Interessensstudie und die internationale ROSE-Studie ist gut erforscht, welche Kontexte und Inhalte Lernende als interessant ansehen (IPN, 1998; ROSE-Studie, 2010). In der ROSE-Studie in Deutschland und Österreich schneiden die Inhalte bei Schüler*innen gut ab, die sich mit dem Universum, Zoologie oder Humanbiologie beschäftigen. Bei den Kontexten sind es spektakuläre, Jugend- und Gesundheitskontexte, oder Kontexte, die sich mit

der Mystik und dem Wundersamen beschäftigen. Die ROSE-Studie zeigt auch, dass es bei den Interessen große Unterschiede zwischen Mädchen und Jungen gibt. Humanbiologie, Fitness, Mystik und Wunder sowie Ästhetik sind für Mädchen interessanter, während technische Inhalte, Chemie, Energie und spektakuläre Kontexte bei den Jungen besser abschneiden (D. Elster, 2010).

Gleichzeitig stellen unter anderem auch diese Studien fest, dass der Anspruch der Interessantheit vom naturwissenschaftlichen Unterricht eher nicht erreicht wird. So zeigt zum Beispiel schon die IPN-Interessensstudie mit Daten aus den 80er Jahren, dass das Interesse, insbesondere an naturwissenschaftlichen Fächern bei Mädchen, im Laufe der Sekundarstufe I abnimmt (IPN, 1998). Die internationale ROSE-Studie konnte zeigen, dass naturwissenschaftliche Fächer besonders in wohlhabenderen Ländern wie Deutschland weniger Relevanz für die befragten Schüler*innen haben (ROSE-Studie, 2019). Die SINUS-Studie zur MINT-Motivation (2024) zeigt zudem, dass MINT-Fächer auch im Vergleich mit anderen Schulfächern eher unbeliebt sind.

Das Interesse von Schüler*innen an physikalischen Kontexten lässt sich nach Zöchling (2023) in eine hierarchische Struktur unterschiedlicher Interessensstufen einordnen. Die erste Stufe bildet das fokussierte Interesse, das bei der Mehrheit der Schüler*innen zu

beobachten ist. Dieses richtet sich vornehmlich auf bestimmte, fokussierte Kontexte. Dazu gehören Themen rund um den eigenen Körper, sozialwissenschaftliche Fragestellungen sowie grundlegende, existentielle Fragen der Menschheit, etwa die Frage nach dem Ursprung des Lebens.

Auf der nächsthöheren Stufe befindet sich das offene Interesse, das von einer geringeren Anzahl an Schüler*innen gezeigt wird. Es umfasst zusätzlich zu den fokussierten Interessen auch das Interesse an alltagsbezogenen physikalischen Fragestellungen, wie etwa der Funktionsweise technischer Geräte (z. B. Digitalkameras) oder physikalischen Phänomenen des täglichen Lebens.

Die höchste Stufe stellt das breite Interesse dar, das nur von wenigen Schüler*innen gezeigt wird. Dieses schließt über die genannten Kontexte hinaus auch ein Interesse an abstrakten wissenschaftlichen Themen (z. B. Elementarteilchenphysik) sowie an technischen Fragestellungen, wie etwa der Arbeit in einer Autowerkstatt oder Prozessen der Erdölverarbeitung, ein.

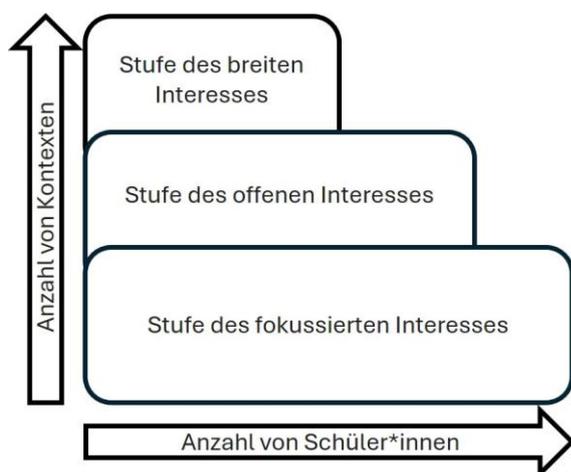


Abb. 1: Konzeption des Physikinteresses als Hierarchie von drei Physikinteressen-Stufen (nach Zöchling, 2023).

2. Interessen und ihre Entwicklung

In der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung wird Interesse als dynamische Beziehung zwischen einer Person und einem Interessensgegenstand konzeptualisiert. Die Person-Gegenstands-Beziehung des Interesses (POI) nach Krapp (1992) beschreibt diese Beziehung und postuliert, dass eine positive Entwicklung des Interesses an einem Interessensgegenstand immer begleitet ist von positiven Erlebniszuständen bei der Interaktion mit besagtem Gegenstand. Diese leiten sich aus der Selbstbestimmungstheorie der Motivation nach Deci & Ryan (1991) ab und umfassen das Gefühl von Kompetenz, das Erleben von Selbstbestimmung (Autonomie), soziale Eingebundenheit sowie die Erfahrung von Neuem oder Unbekanntem (Krapp, 1992).

Interesse kann sich nach Krapp entwickeln, wenn sich eine Person wiederholt in Lernsituationen mit einem Interessensgegenstand auseinandersetzt. Ist eine

Lernsituation ansprechend, so entsteht situationales Interesse am Interessensgegenstand. Durch Wiederholung wird das Interesse am Interessensgegenstand immer weiter internalisiert und wird zu einem individuellen Interesse. Diese Internalisierung erfolgt laut Krapp (1992) entlang der drei selbstbestimmten Stufen der Motivation nach Deci & Ryan (1991):

- Introjektion: Eine Person setzt sich mit einem Gegenstand auseinander, weil die Ergebnisse der Handlung als Voraussetzung für die Erfüllung eigener Wünsche gesehen werden.
- Identifikation: Die Auseinandersetzung mit dem Gegenstand ist für sich wünschenswert und momentan persönlich wichtig.
- Integration: Der Gegenstand und die Beschäftigung mit dem Gegenstand sind dauerhaft und konsistent konfliktfrei Teil der eigenen Ziele und können dem individuellen Selbst zugeordnet werden

Lewalter et al. (1998) entwickelten im Rahmen einer Interviewstudie zur Entwicklung berufsspezifischer Interessen eine methodische Vorgehensweise, bei der die subjektiven Aussagen der Befragten systematisch bedürfnisspezifischen Erlebnisqualitäten zugeordnet wurden. Dieses Zuordnungsprinzip basierte auf der Feststellung, dass das Erleben von Interesse durch die spezifischen Erlebniszustände, etwa dem Erleben von Kompetenz bei der Durchführung einer fortgeschrittenen Aufgabe, erinnert wird.

Der Verlauf der Interessenentwicklung nach Krapp (1992) hängt durch die Internalisierung von Interessensgegenständen eng mit der Persönlichkeitsentwicklung zusammen. Durch die Auseinandersetzung mit Gegenständen und deren Integration in das Selbst über das Interesse, aber auch durch Ablehnung und Abgrenzung von bestimmten Interessensgegenständen kann das eigene Selbstkonzept definiert werden (Krapp, 2002). Interessenentwicklung ist damit ein höchst individueller Prozess. Um diesen Prozess besser zu verstehen, ist es erforderlich, stärker an den alltäglichen Erfahrungen von Schülerinnen anzusetzen, die individuellen Wege der Interessenentwicklung im Alltag nachzuzeichnen und dabei sowohl situative Bedingungen als auch das persönliche Erleben zu berücksichtigen.

3. Forschungsfragen

Obwohl die Auseinandersetzung mit Interessensgegenständen als zentraler Bestandteil der Interessenentwicklung gilt, liegen bislang nur begrenzte empirische Erkenntnisse darüber vor, wie diese Beschäftigung im Alltag jugendlicher Schüler*innen konkret stattfindet. Insbesondere ist wenig darüber bekannt, welche Faktoren aus Sicht der Lernenden bei der Auseinandersetzung mit potenziell interessanten Themen eine zentrale Rolle spielen und auf welche Weise bestimmte Inhalte überhaupt als interessant wahrgenommen und als solche bewertet werden. Daraus ergeben sich folgende Fragestellungen:

1. Wie kommt es dazu, dass Jugendliche bestimmte, fokussierte Themen als interessant betrachten?
2. Welche Faktoren spielen dabei eine Rolle?
3. Finden sich Faktoren, die zur nachhaltigen Entwicklung von Interesse im Unterricht genutzt werden können?

4. Methodik

4.1. Interviews mit Schüler*innen

Interesse entwickelt sich nach Krapp aus der positiv bewerteten Interaktion einer Person mit einem Interessensgegenstand. Zur Beantwortung der Forschungsfragen muss daher zunächst geklärt werden, welche Interaktionen im Alltag der Schüler*innen stattfinden, wie sich diese Interaktionen konkret ausgestalten und ob bestimmte Interaktionen für die Entwicklung von Interesse relevanter sind als andere.

Zur Identifikation dieser Interaktionssituationen wurden Interviews mit $N = 7$ Schüler*innen im Alter von 12 bis 15 Jahren geführt. Darin wurden die Schüler*innen zu aktuellen und vergangenen Interessensgebieten oder Fragestellungen, die in der Vergangenheit ihr Interesse¹ geweckt hatten befragt. Besondere Schwerpunkte wurden in den Interviews auf erste Begegnungen, die Beschäftigung, persönlichen Wert und Interessantheit der Interessensgegenstände für Dritte gelegt. Auch nach der Art des Interesses, ob es sich um fokussierte Interessen für bestimmte Gegenstände oder um breitere Interessensgebiete handelt, wurde gefragt.

4.2. Ergebnisse der Interviews

Bei der Auswertung der Schüler*innenaussagen konnte festgestellt werden, dass erste Begegnungen mit Interessensgegenständen zu etwa gleichen Teilen stattfinden, wenn sich die Schüler*innen mit den Interessen ihrer Freund*innen oder ihres sozialen Umfelds beschäftigen, im Alltag und Umgebung auf etwas interessantes stoßen, oder in der Schule mit Themen in Kontakt kommen, die sie als relevant wahrnehmen. Die Beschäftigung mit bestehenden Interessen findet in über der Hälfte der Fälle im sozialen Umfeld oder beim Nutzen des Internets statt. Hier spielen aber auch das Lesen von Büchern, eigenständiges Experimentieren, das Besuchen von Veranstaltungen und sonstige Medien eine Rolle.

Durch die Nutzung der Auswertemethode nach Lewalter et al. (1998) konnte festgestellt werden, dass je 22 % der Aussagen der Schüler*innen dem Autonomiegefühl oder dem Erleben von Kompetenz zugeordnet werden können. Eine größere Rolle scheint dem Erleben von sozialer Zugehörigkeit allein (32%) oder in Verbindung mit Kompetenzerleben (21%) zuzukommen. Weniger häufig treten Kompetenz und Autonomie zusammen auf (3%), Autonomie und soziale Kompetenz erhalten zusammen keine Zuordnung.

Auffällig ist dabei, dass die Schüler*innen häufig im Zusammenhang mit ihrer Beschäftigung mit Interessen, aber auch bei ihren ersten Begegnungen mit Interessensgegenständen, das Erleben von sozialer Zugehörigkeit beschreiben. Diesem Aspekt soll auch in der Gestaltung des Fragebogens Rechnung getragen werden.

4.3. Fragebogenerhebung

Für eine quantitative Einschätzung der Relevanz der von den Schüler*innen beschriebenen Situationen wurde mithilfe der Interviewergebnisse ein Fragebogen gestaltet.

Im Fragebogen wurde neben Personenmerkmalen (Alter, Geschlecht, Schulform) ähnlich zu den Interviews nach der Einschätzung der Lernenden zu ihren Interessen gefragt. Die Fragen nach dem Interesse beinhalteten:

- einen selbst gewählten Interessensgegenstand als konkreten Anhaltspunkt
- die Überschneidung der Interessen mit dem sozialen Umfeld
- die Häufigkeit von Interessantem in vorgegebenen Situationskontexten
- die Häufigkeit der Beschäftigung mit Interessen in vorgegebenen Situationskontexten

Diese Fragen wurden analog für allgemeine Interessen, sowie Interessen mit Bezug zur Physik, Biologie und Geschichte gestellt. Bei den Interessen mit (möglichem) Fachbezug wurde zusätzlich nach der Häufigkeit von Interessantem in vorgegebenen Unterrichtssituationen sowie nach dem Sach- und Fachinteresse (nach Pekrun et al., 2002) gefragt. Die Formulierung der vorgegebenen Situationskontexte erfolgte eng entlang der Schüler*innenaussagen und beinhalten das Verbringen von Zeit mit Freund*innen, Familie oder in der Schule, unterschiedliche Formen der Internetnutzung sowie weitere von den Schüler*innen genannte Situationskontexte. Die Einschätzung der Schüler*innen erfolgte anhand von 4-stufigen Likert-Skalen.

Zusätzlich wurden die allgemeine Relevanz von Naturwissenschaften, das Interesse an Naturwissenschaften mit Skalen von Frey et al. (2016) und das soziale Selbstkonzept mit einer Skala von Wagner et al. (2011) erhoben.

Aus forschungsökonomischen Gründen wurde der Fragebogen von zwei Teilstichproben ausgefüllt. Eine Teilgruppe erhielt den Fragebogen mit den allgemeinen und physikalischen Interessen, während die andere den Fragebogen mit Fragen zu Geschichts- und Biologieinteressen ausfüllen sollte. Im Folgenden werden erste deskriptive Ergebnisse aus der ersten Erhebung vorgestellt.

4.4. Stichprobe

Der Fragebogen zu den allgemeinen und physikalischen Interessen wurde von Dezember 2024 bis Februar 2025 von insgesamt $N = 392$ hessischen Schüler*innen aller allgemeinbildenden weiterführenden Schulformen ausgefüllt. Darunter 208 weibliche, 177

¹ „Interesse“ bezeichnet hier die für die Schüler*innen alltagssprachliche Verwendung des Interessensbegriffs.

Tab. 1: Kennwerte des Mittelwertvergleichs zwischen allgemeinen und physikalischen Interessen je Situationskontext.

Situationskontext	M Allgemeine Interessen	SD Allgemeine Interessen	M Physikalische Interessen	SD Physikalische Interessen	p-Wert (391 Frei- heitsgrade)	Signifikanz
Meine Interessen überschneiden sich mit den Interessen...						
... meiner Freunde.	3,01	0,76	2,04	0,85	17.664	.001***
... meiner Familie.	2,20	0,73	2,05	0,82	13.475	.001***
... meiner Klasse.	2,61	0,84	1,89	0,87	3.014	.025*
Wie oft erfährst du in den folgenden Kontexten etwas Interessantes?						
Aus meinem Freundeskreis.	3,32	0,77	1,64	0,78	31.125	.001***
Bei meiner Familie.	2,99	0,78	2,07	0,94	17.292	.001***
In der Schule.	2,72	0,86	3,21	0,92	-9.489	.001***
Wenn ich mich mit meinen Interessen beschäftige...						
... unternehme ich etwas mit meinen Freunden.	3,01	0,87	1,54	0,82	26.979	.001***
... unternehme ich etwas mit meiner Familie.	3,23	0,77	1,86	0,92	21.089	.001***
... bin ich in der Schule	2,28	0,93	2,87	1,08	-9.968	.001***

männliche und 7 diverse Schüler*innen mit einer Altersspanne von zwölf bis siebzehn Jahren. Die Schüler*innen besuchen die 6 bis 10 Klasse.

5. Erste Ergebnisse und Diskussion

Zur ersten Einschätzung der Ergebnisse in Bezug auf die Bedeutung der unterschiedlichen Situationskontexte bietet es sich an, zunächst einen Vergleich zwischen den allgemeinen Interessen und physikalischen Interessen anzustellen. In Tabelle 1 ist dazu ein Ausschnitt der Mittelwerte, Standardabweichungen und Kennwerte des zweiseitigen t-Tests dargestellt. Die Einschätzung der Schüler*innen erfolgte für die Überschneidung und die Beschäftigung auf einer Skala von 1 (trifft gar nicht zu) bis 4 (trifft voll zu) und für das Erfahren von Interessantem von 1 (sehr selten) bis 4 (sehr häufig). Eine vollständige Tabelle findet sich im Anhang.

5.1 Privates Umfeld und Schule

Es zeigt sich, dass Schüler*innen im familiären und freundschaftlichen Umfeld zu den von ihnen genannten physikalischen Interessensgegenständen seltener neue oder interessante Informationen erhalten als zu ihren allgemeinen Interessen. Dieses Muster spiegelt sich auch in der aktiven Auseinandersetzung mit den jeweiligen Interessensgegenständen wider und wird bestätigt durch die wahrgenommene Überschneidung

der Interessen mit Familie und Freunden. Auch die sonstigen Situationskontexte zeigen ein ähnliches Muster, wenn auch der Unterschied häufig weniger deutlich ist als in den hier genannten Bereichen (vgl. Tabelle 2 im Anhang).

Ein anderes Verhältnis kann beim Vergleich der Interessensbereiche im Situationskontext Schule bzw. Klasse festgestellt werden. Die wahrgenommene Überschneidung der Interessen ist hier weniger unterschiedlich. Schüler*innen haben also eher das Gefühl, dass sich ihre allgemeinen Interessen genauso mit den Interessen ihrer Mitschüler*innen überschneiden wie ihre physikalischen Interessen (auch wenn immer noch ein signifikanter Unterschied festzustellen ist). Zudem erfahren Schüler*innen zu ihren physikalischen Interessen häufiger etwas Neues und Interessantes in der Schule und beschäftigen sich dort auch eher damit als in anderen Situationen.

Diese Ergebnisse haben verschiedene mögliche Implikationen. Zum einen wird die Rolle der Schule in Bezug auf physikalische Interessen deutlich: Diese nehmen Schüler*innen im Alltag deutlich seltener wahr und sie konkurrieren dort in allen möglichen Situationen mit der Summe der allgemeinen Schüler*inneninteressen. In der Schule werden dedizierte Gelegenheiten zur Auseinandersetzung mit möglichen physikalischen Interessensgegenständen geschaffen und immer neue Interessensgegenstände

oder Aspekte dieser vorgestellt. Es ist möglich, dass so ein wichtiger Beitrag zur nachhaltigen Interessenentwicklung geleistet wird. Zum anderen könnte es sein, dass sich diese Gelegenheiten kaum in die sonstigen Situationskontexte übersetzen. Wenn Schüler*innen in der Schule etwas physikalisch Interessantes erfahren oder sich damit beschäftigen erzeugt dies ein situationales Interesse, welches teilweise mit den anderen Klassenmitgliedern geteilt wird. Dieses könnte noch zum Fachinteresse am Fach Physik beitragen, während ein nachhaltiges Sachinteresse an Physik auf der Strecke bleibt.

6. Ausblick

Für eine tiefere Analyse der Ergebnisse ist eine weitere Auswertung der Einflüsse der einzelnen Situationskontexte auf Sach- und Fachinteresse an Physik notwendig.

Die Relevanz der einzelnen Situationskontexte für das individuelle Sach- und Fachinteresse sollen mithilfe einer Regressionsanalyse abgeschätzt werden. Weitere Schritte könnten anschließend die Zusammenfassung der Einzelindikatoren zu Konstrukten wie „soziales Umfeld“ oder „Internet“ und die weitere Evaluierung der Beziehung der Situationskontexte und dem Sach- und Fachinteresse an Physik beinhalten.

7. Literatur

- Benware, C. A., & Deci, E. L. (1984). Quality of Learning With an Active Versus Passive Motivational Set. *American Educational Research Journal*, 21(4), 755–765.
<https://doi.org/10.3102/00028312021004755>
- Deci, E.L. & Ryan, R.M. (1991). A motivational approach to self: Integration in personality. In R. Dienstbier (Ed.). *Nebraska Symposium on Motivation: Vol. 38: Perspectives on Motivation* (S. 237-288). Lincoln, NE: University of Nebraska Press.
- Elster, D. (2010). *Zum Interesse Jugendlicher an den Naturwissenschaften - Ergebnisse der ROSE Erhebung aus Deutschland und Österreich* (1. Aufl.). Shaker Verlag GmbH.
<https://doi.org/10.2370/OND0000000000091>
- Frey, A., Taskinen, P., Schütte, K., Prenzel, M., Artelt, C., Baumert, J., Blum, W., Hammann, M., Klieme, E., & Pekrun, R. (2016). Fragebogenerhebung PISA 2006 (Skalenkollektion). *Programme for International Student Assessment*.
<https://doi.org/10.7477/51:288:1>
- Hoffmann, L., Häußler, P., & Lehrke, M. (1998). *Die IPN-Interessenstudie Physik*. IPN.
- Jansen, M., Lüdtke, O. & Schroeders, U. (2016). Evidence for a positive relation between interest and achievement: Examining between-person and within-person variation in five domains. *Contemporary Educational Psychology*, 46, 116–127.
<https://doi.org/10.1016/j.cedpsych.2016.05.004>
- Köller, O., Baumert, J., & Schnabel, K. (2001). Does Interest Matter? The Relationship between Academic Interest and Achievement in Mathematics. *Journal for Research in Mathematics Education*, 32(5), 448–470.
<https://doi.org/10.2307/749801>
- Krapp, A. (1992). Das Interessenskonstrukt. Bestimmungsmerkmale der Interessenhandlung und des individuellen Interesses aus der Sicht einer Person-Gegenstands-Konzeption. In A. Krapp & M. Prenzel (Hrsg.), *Interesse, Lernen, Leistung: Neuere Ansätze der pädagogisch—Psychologischen Interessenforschung* (S. 297–329). Aschendorff.
- Krapp, A. (2002). Structural and dynamic aspects of interest development: Theoretical considerations from an ontogenetic perspective. *Learning and Instruction*, 12(4), 383–409.
[https://doi.org/10.1016/S0959-4752\(01\)00011-1](https://doi.org/10.1016/S0959-4752(01)00011-1)
- Lewalter, D., Krapp, A., Schreyer, I., Wild, K.P. (1998). Die Bedeutsamkeit des Erlebens von Kompetenz, Autonomie, und sozialer Eingebundenheit für die Entwicklung berufsspezifischer Interessen. In: Beck, K. & Dubs, R. (1998). *Kompetenzentwicklung in der Berufserziehung: kognitive, motivationale und moralische Dimensionen kaufmännischer Qualifizierungsprozesse*. Franz Steiner Verlag.
- Marsh, H. W., Trautwein, U., Lüdtke, O., Köller, O. & Baumert, J. (2005). Academic Self-Concept, Interest, Grades, and Standardized Test Scores: Reciprocal Effects Models of Causal Ordering. *Child Development*, 76(2), 397–416.
<https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2005.00853.x>
- Ozel, M., Caglak, S. & Erdogan, M. (2012). Are affective factors a good predictor of science achievement? Examining the role of affective factors based on PISA 2006. *Learning And Individual Differences*, 24, 73–82.
<https://doi.org/10.1016/j.lindif.2012.09.006>
- Pekrun, R., Götz, J. S., Zirngibl, A., vom Hofe, R., & Blum, W. (2002). *Skalenhandbuch PALMA (1. Messzeitpunkt 5. Klassenstufe)*. Institut für Pädagogische Psychologie.
- Retelsdorf, J., Köller, O., & Möller, J. (2011). On the effects of motivation on reading performance growth in secondary school. *Learning and Instruction*, 21(4), 550–559.
<https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2010.11.001>
- Schiefele, U., Krapp, A., & Winteler, A. (1988). Studieninteresse und fachbezogene Wissensstruktur. *Psychologie in Erziehung und Unterricht*, 35, 106–118.
- SINUS-Institut. (2024). Integrierter Gesamtbericht des SINUS-Instituts MINT Motivation (Von Deutsche Telekom Stiftung). <https://www.telekom-stiftung.de/sites/default/files/files/dts->

sinus-studie-mint-motivation-abschlussbericht.pdf

Sjøberg, Svein & Schreiner, Camilla (2010). *The ROSE project. An overview and key findings.*

Sjøberg, Svein & Schreiner, Camilla. (2019). *ROSE (The Relevance of Science Education). The development, key findings and impacts of an international low cost comparative project. Final Report.*

Wagner, W., Helmke, A., & Rösner, E. (2011). DESI - Eingangsbefragung (Skalenkollektion). *Deutsch Englisch Schülerleistungen International*. <https://doi.org/10.7477/6:9:1>

Zöchling, S. M. (2023). *Students' Types of Interest in Physics Revisited*, <https://doi.org/10.25365/THESIS.74729>

Anhang

Tab. 2a: Kennwerte des Mittelwertvergleichs zwischen allgemeinen und physikalischen Interessen je Situationskontext.

Situationskontext	M Allgemeine Interessen	SD Allgemeine Interessen	M Physikalische Interessen	SD Physikalische Interessen	p-Wert (391 Frei- heitsgrade)	Signifikanz
Meine Interessen überschneiden sich mit den Interessen...						
... meiner Freunde.	3,01	0,76	2,04	0,85	17.664	.001***
... meiner Familie.	2,20	0,73	2,05	0,82	13.475	.001***
... meiner Klasse.	2,61	0,84	1,89	0,87	3.014	.025*
... anderer Personen	2,40	0,85	1,91	0,93	7,977	.001***
Wie oft erfährst du in den folgenden Kontexten etwas Interessantes?						
Aus meinem Freundeskreis.	3,32	0,77	1,64	0,78	31.125	.001***
Bei meiner Familie.	2,99	0,78	2,07	0,94	17.292	.001***
In der Schule.	2,72	0,86	3,21	0,92	-9.489	.001***
Aus Videos und Social Media.	3,27	0,83	2,72	0,99	10.886	.001***
Recherche mit Suchmaschine.	2,89	0,86	2,60	0,97	5.500	.001***
Aus Messengern.	2,37	0,85	1,54	0,76	17.512	.001***
Bei Veranstaltungen.	2,72	0,86	1,98	0,98	4.893	.001***
Aus anderen Medien.	2,24	0,92	1,94	1,00	9.224	.001***
Von anderen Personen.	2,49	1,02	1,74	0,94	11.389	.001***

Tab. 2b: Kennwerte des Mittelwertvergleichs zwischen allgemeinen und physikalischen Interessen je Situationskontext (Fortsetzung).

Wenn ich mich mit meinen Interessen beschäftige...

... unternehme ich etwas mit meinen Freunden.	3,01	0,87	1,54	0,82	26.979	.001***
... unternehme ich etwas mit meiner Familie.	3,23	0,77	1,86	0,92	21.089	.001***
... unterhalte ich mich mit meinen Freunden.	2,64	0,87	1,59	0,83	23.981	.001***
... unterhalte ich mich mit meiner Familie.	2,87	0,88	1,96	0,99	16.285	.001***
... schaue ich Videos auf Social Media.	3,06	0,97	2,49	1,09	9.743	.001***
...bin ich in der Schule	2,28	0,93	2,87	1,08	-9.968	.001***
... recherchiere ich mit einer Suchmaschine.	2,72	0,94	2,60	1,02	1.994	.42
... nutze ich Messenger.	2,23	0,94	1,54	0,79	13.949	.001***
... bin ich in Foren unterwegs.	1,63	0,87	1,40	0,73	5.786	.001***
... nutze ich andere Medien.	2,18	1,03	2,87	1,08	6.119	.001***
... verbringe ich Zeit mit anderen Personen.	2,57	1,08	1,84	1,01	17.603	.001***

Entwicklung und Validierung eines Testinstruments zu einfachen Stromkreisen

Benjamin Groß*, Lana Ivanjek[†], Salome Flegr[°], Judith Glaesser^x, Augustin Kelava^x,
Jan-Philipp Burde*

*Eberhard Karls Universität Tübingen, AG Didaktik der Physik, Auf der Morgenstelle 14, 72076 Tübingen

[†]Johannes Kepler Universität Linz, Abteilung für MINT-Didaktik, Altenberger Straße 68, 4040 Linz

[°]Technische Universität Dresden, Professur für Didaktik der Physik, Haeckelstraße 3, 01069 Dresden

^xEberhard Karls Universität Tübingen, Methodenzentrum, Haufferstraße 11, 72076 Tübingen

benjamin.gross@uni-tuebingen.de

Kurzfassung

Zur Erfassung typischer Lernendenvorstellungen und des konzeptionellen Verständnisses zu einfachen elektrischen Stromkreisen wurde ein dreistufiges Multiple-Choice-Testinstrument entwickelt, d. h. die Items erfassen neben einer Antwort auf eine Frage auch die zugehörige Begründung und die subjektive Sicherheit der Teilnehmenden bei der Beantwortung der Frage. Die in diesem Artikel beschriebene Validierung basiert zunächst auf der zweistufigen Auswertung der Kombinationen aus Antwort und Begründung. Die 18 Testitems wurden auf Basis einer Literaturrecherche konstruiert und decken sechs verbreitete Vorstellungen zu den Konzepten Strom, Spannung, Widerstand, Energiefluss in Stromkreisen sowie deren Systemcharakter ab. Durch eine Expertenbefragung wurde die inhaltliche Validität der Testitems überprüft, die quantitative Evaluation erfolgte in einer Online-Befragung mit $N = 160$ Studierenden naturwissenschaftlicher Studiengänge im ersten Studienjahr. Die Items zeigten angemessene Schwierigkeiten, hohe Trennschärfen und eine sehr gute interne Konsistenz ($\alpha = 0.90$). Konfirmatorische Faktorenanalysen mit Bifaktormodellen ergaben gute Modellfit-Indizes und ausreichend hohe Subskalen-Reliabilitätswerte mit Blick auf Lernendenvorstellungen, was die Diagnosefähigkeit des Testinstruments unterstützt.

1. Einleitung

Einfache elektrische Stromkreise sind ein zentraler Bestandteil des Physikunterrichts in der Sekundarstufe I und stellen zugleich eine wichtige Grundlage für das Verständnis moderner technischer Anwendungen dar. Trotz der intensiven schulischen Behandlung dieses Themenfelds zeigen zahlreiche Studien, dass selbst nach dem Unterricht oftmals Verständnisprobleme bezüglich grundlegender Konzepte wie Strom, Spannung, Widerstand sowie der Funktionsweise elektrischer Stromkreise bestehen – und dies nicht nur bei Schülerinnen und Schülern, sondern auch bei Studierenden der Physik und angehenden Lehrkräften [1–5]. Diese konzeptionellen Schwierigkeiten äußern sich in stabilen, weit verbreiteten und gut dokumentierten Lernendenvorstellungen, die mit wissenschaftlichen Konzepten nicht vereinbar sind [6].

In den letzten Jahrzehnten wurden verschiedene Testinstrumente entwickelt, um das konzeptuelle Verständnis von Lernenden zu elektrischen Stromkreisen zu erfassen [7–10]. Diese Instrumente decken jedoch nur einen begrenzten Bereich von Konzepten ab, weisen eine unzureichende Reliabilität auf oder ermöglichen keine Erfassung von Lernendenvorstellungen. Einige von ihnen weisen zudem grundlegende Schwächen in der Itemkonstruktion auf. Um die Lernendenvorstellungen, das Verständnis der zugehörigen spezifischen physikalischen Konzepte sowie das

allgemeine Konzeptverständnis bezüglich einfacher elektrischer Stromkreise zu erfassen, wurde ein Multiple-Choice-Testinstrument entwickelt. Dieses wurde im Rahmen der hier beschriebenen Studie mit Studierenden im ersten Jahr eines naturwissenschaftlichen oder lehramtsbezogenen Studiums evaluiert, ließe sich aber (ggf. unter Einschränkung auf bestimmte Subskalen) auch im schulischen Kontext einsetzen.

2. Theoretischer Hintergrund

2.1. Typische Lernendenvorstellungen zu Stromkreisen

Auf Basis einer umfassenden Literaturrecherche wurden zunächst sieben Lernendenvorstellungen ausgewählt, die als empirisch gut belegt gelten und einen direkten Bezug zu fundamentalen Konzepten bezüglich elektrischer Stromkreise aufweisen:

- Stromverbrauch (SV, Konzept „elektrischer Strom“): Strom wird als „verbrauchbare“ Substanz verstanden, die durch Bauteile wie Lampen oder Widerstände verbraucht wird – insbesondere in Form eines Abschwächungsmodells (engl. „attenuation model“) [6].
- Batterie als konstante Stromquelle (BKS, Konzept „Batterie“): Die Batterie wird als Stromquelle mit konstanter Stromstärke interpretiert,

obwohl sie physikalisch gesehen (idealisiert) eine konstante Spannung liefert ([3], [4], [11]).

- Vermischung von Spannungs- und Strombegriff (UI, Konzept „Spannung“): Die Spannung wird nicht als eigenständige physikalische Größe erkannt, sondern fälschlicherweise als eine Eigenschaft des elektrischen Stroms verstanden ([7], [12–15]).
- Sequenzielle Argumentation (SEQ, Konzept „Systemcharakter von Stromkreisen“): Der Stromkreis wird als linear-sequenzieller Prozess interpretiert, bei dem der „Strom“ (als Substanz) nacheinander die Schaltungselemente passiert. Daraus wird gefolgert, dass die Reihenfolge der Bauteile entscheidend sei ([3], [6], [16]).
- Lokales Denken (LOK, Konzept „Systemcharakter von Stromkreisen“): Statt den Stromkreis als zusammenhängendes System zu betrachten, wird er auf Basis lokaler Gegebenheiten (z.B. Verzweigungen) analysiert. So wird z.B. davon ausgegangen, dass sich der elektrische Strom an Knotenpunkten gleichmäßig aufteilt ([7], [17]).
- Vernachlässigung der Schaltungsart bei Widerständen (EW, Konzept „Widerstand“): Der Unterschied zwischen Reihen- und Parallelschaltung wird ignoriert; die Anzahl der Widerstände wird als allein entscheidend für den Ersatzwiderstand betrachtet [4].
- Vermischung von Strom- und Energiebegriff (EN, Konzept „Energie“): Energie wird sprachlich wie konzeptionell mit dem Strombegriff gleichgesetzt, was häufig zu falschen Schlüssen über Energieflüsse im Stromkreis führt [6].

2.2. Bisherige Testinstrumente zu elektrischen Gleichstromkreisen

Im Rahmen der Testentwicklung wurde zudem eine Analyse bestehender Testinstrumente zu Gleichstromkreisen durchgeführt. Ziel war es, zentrale Eigenschaften hinsichtlich Zielgruppe, Konzeptabdeckung, Item-Design und psychometrischer Qualität zu untersuchen. Berücksichtigt wurden nur Tests, die sich ausschließlich mit einfachen Gleichstromkreisen befassen. Instrumente mit breiterem thematischen Fokus – etwa auf Elektrostatik, Wechselstrom oder Elektrodynamik – wurden nicht einbezogen, selbst wenn sie teilweise auch Items zu Gleichstromkreisen enthalten (z. B. [18–20]).

Der Test von Rhöneck [7] war eines der ersten Instrumente im deutschsprachigen Raum, das typische Lernendenvorstellungen zu Strom, Spannung und Widerstand thematisierte. Der Test umfasst 12 Items verschiedener Formate (u. a. Multiple Choice, offene Aufgaben), wobei pro Vorstellung meist nur ein oder zwei Items eingesetzt wurden. Auch wenn eine systematische Validierung im Sinne aktueller psychometrischer Standards nicht erfolgte, erlangte der Rhöneck-Test erhebliche Bedeutung.

Ein ausgereifteres Instrument stellt der 2004 entwickelte, englischsprachige DIRECT-Test dar [8]. Dieser Test umfasst 29 einstufige Items zu Strom, Spannung, Widerstand und Energieübertragung. Er wurde mit einer großen Stichprobe von Schülerinnen und Schülern und Studierenden validiert und weist akzeptable Reliabilitätswerte auf. Die Items wurden jedoch nicht direkt auf Basis bestimmter Lernendenvorstellungen konstruiert. Vielmehr wurden diese post-hoc durch Interviews identifiziert. Auch aufgrund seiner Einstufigkeit eignet sich der DIRECT-Test eher zur Erhebung des allgemeinen Konzeptverständnisses als zur gezielten Diagnostik einzelner Vorstellungen.

Der SECDT-Test [21], ursprünglich in türkischer Sprache entwickelt, verwendet ein dreistufiges Item-Format. Neben Antwort und Begründung geben die Teilnehmenden auch ihre Antwortsicherheit an. Die Autoren sehen darin wie Hasan et al. [22] ein Mittel, zwischen fehlendem Wissen und stabilen Vorstellungen zu unterscheiden, was in Anbetracht neuerer empirischer Befunde aus anderen Inhaltgebieten der Physik jedoch kritisch gesehen werden kann [23]. Inhaltlich fokussiert der Test auf den Strombegriff, während andere Konzepte wie Spannung oder Energie kaum berücksichtigt werden. Zudem wurde die Reliabilität von den Autoren als niedrig eingeschätzt, eine weiterführende Validierung (z. B. mittels Faktorenanalyse) wurde nicht durchgeführt.

Mit dem AECCP-Test [9] liegt ein deutschsprachiges Instrument mit 23 Items vor, das teilweise auch zweistufige Fragen verwendet. Der Schwerpunkt liegt auf den Konzepten Strom und Widerstand, der Spannungs- und Energiebegriff werden hingegen nicht abgedeckt. Jede Lernendenvorstellung wird durch mindestens drei Items operationalisiert. Die Ergebnisse einer Faktorenanalyse zeigen, dass einzelne Vorstellungen in diesem Format zuverlässig identifiziert werden können. Der Test weist eine gute Gesamtreliabilität auf [9].

Der 2T-SEC-Test [10] besteht aus 25 durchgängig zweistufigen Items mit je einer Antwort- und Begründungsstufe und deckt dabei auch den Spannungsbegriff ab. Die Auswertung mittels Rasch-Modell ergab gute Item-Fit-Werte sowie eine hohe Item-Reliabilität. Die Personenreliabilität war hingegen nur marginal akzeptabel, und die Schwierigkeit des Tests erwies sich für die Zielgruppe (Sekundarstufe I) als zu hoch. Zudem lag der Fokus der Entwicklung auf physikalischen Konzepten, nicht explizit auf Lernendenvorstellungen. Eine Folge davon ist, dass die durch den Test abgedeckten Lernendenvorstellungen mit unterschiedlich vielen Items erfasst werden und keine Faktorenanalysen zur Validierung der Lernendenvorstellungen durchgeführt wurden.

3. Ziele und Testentwicklungsprozess

Das hier beschriebene Testinstrument wurde im Rahmen eines gemeinsamen Forschungsprojekts dreier Universitäten in Deutschland und Österreich entwickelt.

3.1. Zielsetzung

Die Entwicklung des Testinstruments erfolgte auf der Grundlage der zuvor durchgeführten Analyse existierender Testinstrumente (vgl. Abschnitt 2.2). Das Instrument sollte dabei zentrale Konzepte wie Strom, Spannung, Widerstand, Batterie, Systemcharakter und Energie sowie zugehörige, verbreitete Lernendenvorstellungen ausgewogen abdecken. Im Rahmen der hier vorgestellten statistischen Evaluation sollte die Validität des Testinstruments untersucht werden - speziell inwieweit die Erfassung

- des übergreifenden Konzeptverständnisses,
- einzelner typischer Lernendenvorstellungen und
- des Verständnisses einzelner physikalischer Konzepte (z.B. Strom, Spannung und Widerstand)

möglich ist. Ziel war zunächst die Konstruktion zweistufiger Items, d. h. insbesondere von passenden Fragestellungen inklusive geeigneter Antwort- und Begründungsdistraktoren. Um weitere Fragestellungen bezüglich der Stabilität von Lernendenvorstellungen untersuchen zu können, wurden diese Items zudem um eine dritte Stufe erweitert, welche in einer sechstufigen Likert-Skala auch die von den Teilnehmenden subjektiv wahrgenommene Sicherheit bei der Beantwortung der Frage erfasst. Im Folgenden wird hierauf jedoch nicht weiter eingegangen, da dieser Artikel sich mit der Erfassung des konzeptionellen Verständnisses mittels der ersten beiden Stufen des Testinstruments befasst.

3.2. Entwicklungsschritte

Die initiale Testentwicklung verlief folgendermaßen:

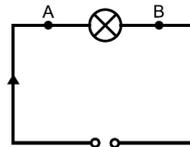
- Identifikation relevanter Vorstellungen: Basierend auf einer Literaturrecherche wurden sieben weit verbreitete Lernendenvorstellungen zu den Kernkonzepten bezüglich einfacher Stromkreise bestimmt (siehe Abschnitt 2.2).
- Sichtung bestehender Instrumente und Item-adaption: Aus bestehenden Testinstrumenten wurden Items ausgewählt, die zur Messung der definierten Vorstellungen, ggf. in adaptierter Form, geeignet erschienen. Im Falle der Adaption einstufiger Items wurde eine zweite Stufe in Form geeigneter Begründungsdistraktoren ergänzt. Wo dies nicht möglich war, wurden Items neu entwickelt.
- Itementwicklung: Für jede der sieben Vorstellungen wurden vier zweistufige Single-Choice-Items konstruiert, was zu einer vorläufigen Testversion mit 28 Items führte. Jedes Item enthält eine Schaltskizze, einen Beschreibungstext und eine fachliche Frage mit mehreren Antworten (Stufe 1) sowie passenden Begründungen (Stufe 2). Bei jedem Item ist aus physikalischer Sicht genau eine Kombination von Antwort und Begründung korrekt. Zusätzlich wurden jeweils meist eine, teils auch mehrere spezifische Distraktoren-Kombinationen (d.h. Antwort und Begründung)

konstruiert, die als Indikator für eine bestimmte Lernendenvorstellung dienen.

Besonderes Augenmerk wurde allgemein auf die Vergleichbarkeit innerhalb von Item-Gruppen zu einer bestimmten Vorstellung gelegt, indem z.B. nicht nur ähnliche Stromkreise betrachtet werden, sondern wo möglich auch auf eine Vergleichbarkeit der Frage- und Distraktoren-Formulierungen geachtet wurde. Ferner wurde auch die Anzahl der Distraktoren auf beiden Stufen innerhalb jeder Item-Gruppe konstant gehalten, um statistische Verzerrungen zu vermeiden. Alle Items des Testinstruments wurden so konstruiert, dass eine Beantwortung der Frage inklusive zugehöriger Begründung auf rein konzeptueller Ebene erfolgen kann und keinerlei Berechnungen nötig sind. Zum Test gehört ebenfalls eine Instruktion, in der den Teilnehmenden die verwendeten Schaltsymbole erläutert sowie allgemeine Hinweise und Anweisungen zur Testdurchführung gegeben werden. Ein Beispielim ist in Abb. 1 dargestellt.

Auf Basis der statistischen Evaluation und dem Experten-Feedback wurden je Vorstellungskategorie aus den ursprünglich vier Items jeweils drei in die finale Testversion übernommen. Da die Items zur Vorstellung „Lokales Denken“ entfernt werden mussten (siehe Abschnitt 4), umfasst die finale Testversion 18 Items, mit denen sechs Lernendenvorstellungen erfasst werden können.

Im abgebildeten Stromkreis ist eine Glühlampe mit einer Batterie verbunden und leuchtet.



Was lässt sich über die Stromstärke am Punkt B im Vergleich zur Stromstärke am Punkt A aussagen?

- Die Stromstärke am Punkt B ist Null.
- Die Stromstärke am Punkt B ist kleiner als am Punkt A, aber nicht Null.
- Die Stromstärke am Punkt B ist gleich groß wie am Punkt A.

Wie haben Sie Ihre obige Antwort begründet?

Wichtig: Wählen Sie diejenige Begründung aus, die am ehesten Ihrem eigenen Gedankengang bei der Beantwortung der Frage entspricht.

- Die leuchtende Glühlampe verbraucht den kompletten Strom.
- Die leuchtende Glühlampe verbraucht einen Teil des Stroms.
- Durch das Leuchten der Glühlampe wird kein Strom verbraucht.

Abb. 1: Beispielim aus dem Testinstrument zur Vorstellung „Stromverbrauch“ (adaptiert nach einem Item aus dem 2T-SEC-Test [10])

4. Evaluation

In diesem Abschnitt wird die grundsätzliche Vorgehensweise bei der Evaluation des Testinstruments sowie eine Auswahl der wesentlichen Ergebnisse vorgestellt. Für eine ausführlichere Darstellung sei auf die englischsprachige Publikation zum Testinstrument verwiesen, welche sich aktuell in Vorbereitung befindet.

4.1. Expertenbefragung

Im Anschluss an die initiale Item-Entwicklung wurde eine Expertenbefragung durchgeführt, um die inhaltliche Validität der entwickelten Items zu überprüfen. Fünf Experten der Physikdidaktik mit aktiver Forschungstätigkeit sowie Lehrerfahrung auf Schul- oder Hochschulebene nahmen an der Befragung teil. Dabei war keiner der Experten an der Entwicklung der Items direkt beteiligt.

Die Befragung erfolgte anhand eines Dokuments mit sämtlichen 28 zweistufigen Items sowie den Instruktionen für Testteilnehmende. Die Experten erhielten eine Liste, in der für jedes Item die als korrekt intendierte Kombination aus Antwort und Begründung angegeben war. Zudem wurden jene Kombinationen ausgewiesen, die aus Sicht der Entwickler spezifischen Lernendenvorstellungen zugeordnet werden sollten, zusammen mit Definitionen der zu erhebenden Vorstellungen.

Die Aufgabe der Experten bestand darin,

- die jeweils angegebene Kodierung zu bewerten (Skala: volle Zustimmung / Zustimmung mit Einschränkungen / Ablehnung);
- eine kurze Begründung anzugeben, sofern einer Kodierung nicht vollständig zugestimmt wurde;
- ggf. Kommentare zu Items, Begründungen oder Formulierungen abzugeben.

Die Rückmeldungen belegten eine hohe Zustimmung zu den angegebenen Kodierungen: Alle Kombinationen von Antwort und Begründung, die aus physikalischer Sicht korrekt sind, wurden zumeist einstimmig oder mit großer Mehrheit von den Experten akzeptiert. Auch die angegebenen Zuordnungen bestimmter Kombinationen von Antwort und Begründung zu Lernendenvorstellungen wurden mehrheitlich von den Experten bestätigt. Einigen dieser Antwortkombinationen wurden von einzelnen Experten jedoch nur mit Einschränkungen zugestimmt – insbesondere dann, wenn die sprachliche Formulierung eine alternative Interpretation zuließ oder wenn sich Distraktoren nicht eindeutig von anderen Vorstellungen abgrenzen ließen. In solchen Fällen wurden entweder die betreffenden Zuordnungen zu Lernendenvorstellungen entfernt oder die Formulierungen überarbeitet. Die Rückmeldungen führten darüber hinaus zur generellen Verbesserung der Distraktoren hinsichtlich deren allgemeiner Verständlichkeit sowie der Konsistenz von Formulierungen innerhalb der zu den Lernendenvorstellung gehörenden Item-Gruppen. Insgesamt stützen die Ergebnisse der Expertenbefragung nicht nur die inhaltliche Validität des Instruments, sondern dienen darüber hinaus als Grundlage für die abschließende Kodierung der Lernendenvorstellungen und (neben statistischen Kriterien) auch für die Itemauswahl in der finalen Testversion.

4.2. Quantitative Evaluation

4.2.1. Durchführung und Stichprobe

Das Testinstrument wurde in den Sommersemestern 2023 und 2024 an sechs Universitäten im deutschsprachigen Raum online pilotiert. Teilnehmende waren Studierende der Physik sowie naturwissenschaftlicher Fächer mit Physikbezug sowie Lehramtsstudierende im ersten Studienjahr. Die Testdurchführung fand dabei vor der ersten Behandlung der Elektrizitätslehre im Rahmen universitärer Lehrveranstaltungen statt.

Die Teilnahme erfolgte freiwillig, im Rahmen von Lehrveranstaltungen oder individuell von zu Hause aus per Link zum Fragebogen über hochschulinterne Verteiler. Insgesamt wurden 176 Datensätze erhoben, von denen 13 aufgrund unvollständiger Bearbeitung oder sehr kurzer Bearbeitungszeiten ausgeschlossen wurden [24]. Die finale Stichprobe umfasste $N = 160$ Personen. Die mittlere Bearbeitungszeit betrug 24 Minuten (Median).

Die Testadministration erfolgte online über die Plattform SoSci Survey. Die Items wurden einzeln präsentiert, wobei die zweite Stufe (Begründung) erst nach Beantwortung der ersten Stufe (Antwort) sichtbar wurde. Eine Änderung der Antwort auf der ersten Stufe war dann nicht mehr möglich. Diese sequenzielle Darstellung diente dazu, unerwünschte Antwortstrategien auszuschließen, die durch parallele Sichtbarkeit beider Stufen bei papierbasierten Tests begünstigt werden können (vgl. [25]). Eine Rückkehr zu vorherigen Fragen war ebenfalls nicht möglich.

4.2.2. Methoden

Zur quantitativen Evaluation des Testinstruments wurden verschiedene Verfahren der klassischen Testtheorie sowie explorative und konfirmatorische Faktorenanalysen eingesetzt. Die verwendeten Methoden und deren Bewertungskriterien orientieren sich an etablierten Empfehlungen zur Prüfung der Güte von Konzepttests, z. B. nach Jorion et al. [26]. Nachfolgend sind die eingesetzten Verfahren und die jeweils zugrunde gelegten Gütekriterien aufgeführt.

- Itemschwierigkeiten: Anteil der Teilnehmenden, die die korrekte Kombination aus Antwort und Begründung wählen
- Item-Trennschärfen: Korrelation zwischen Item-Scores und Gesamtttestscore
- Reliabilität (Cronbach's Alpha): interne Konsistenz über alle Items hinweg
- Distraktorenanalyse: Anteil der Teilnehmenden, die eine spezifisch kodierte Lernendenvorstellung wählen
- Explorative Faktorenanalyse (EFA): Parallelanalyse zur Ermittlung der Anzahl latenter Faktoren; Interpretation der Faktorenlösungen bzgl. erwarteter Zuordnung zu Items

- Konfirmatorische Faktorenanalyse (CFA): Bifaktormodelle; Modellfit, Faktorladungen und zugehörige Reliabilitätskennwerte (Gesamtreliabilität ω , hierarchische Reliabilitätswerte ω_h des Generalfaktors und der Subskalen) [27]

4.2.3. Ergebnisse

Die im Folgenden berichteten Ergebnisse beziehen sich auf die finale Testversion, d. h. es wurden bei der statistischen Evaluation nur die Antworten auf die darin enthaltenen 18 Items berücksichtigt. Die Items zum Lokalen Denken wurden auf Basis der Strukturanalyse entfernt (siehe auch Abschnitt 4.2.3.2).

4.2.3.1. Distraktorenanalyse und deskriptivstatistische Kennwerte

Die Distraktoren der zu den Lernendenvorstellungen gehörigen Antwortkombinationen wurden je nach Item von 16 % bis 51 % der Teilnehmenden gewählt und sind daher ausreichend attraktiv. Die Items weisen mit 13 % bis 63 % korrekten Antworten eine breite Streuung der Schwierigkeit auf, was eine gute Differenzierung zwischen einfachen und schwierigen Items darstellt und mit wenigen Ausnahmen im empfohlenen Bereich liegt [26]. Die Trennschärfen der Items liegen im Bereich von 0.38 bis 0.69 und sind damit durchgehend als sehr gut zu bewerten [26].

Die interne Konsistenz der finalen 18-Item-Version wurde mittels Cronbachs Alpha bestimmt ($\alpha = 0.90$), was auf eine hohe Reliabilität des Instruments hinweist. Aufgrund der erwarteten Multidimensionalität des Tests muss dieser Wert jedoch mit Vorsicht interpretiert werden.

4.2.3.2. Strukturanalysen

Bei der Strukturanalyse basierend auf Lernendenvorstellungen wurde eine dichotome Kodierung gewählt, abhängig davon, ob eine gewählte Kombination aus Antwort (Stufe 1) und Begründung (Stufe 2) die mit dem jeweiligen Item erfasste Lernendenvorstellung repräsentiert („1“) oder nicht („0“). Die Parallelanalyse mit anschließender explorativer Faktorenanalyse mit obliquen Rotation (korrelierte Faktoren) ergab eine fünffaktorielle Struktur, wobei in der resultierenden Faktorlösung die latenten Faktoren größtenteils inhaltlich gut interpretierbar sind. Die Faktoren zeigen darüber hinaus hohe Korrelationen untereinander. Vor diesem Hintergrund wurde zudem ein Bifaktormodell mit einem auf allen Items ladenden Generalfaktor und zunächst sieben untereinander und zum Generalfaktor orthogonalen spezifischen Faktoren als Strukturgleichungsmodell gewählt. Der spezifische Faktor zur Vorstellung LOK (Lokales Denken) zeigte keine signifikant von Null verschiedenen Faktorladungen, weshalb diese Items aus dem finalen Testinstrument entfernt wurden und das Modell anschließend mit sechs spezifischen Faktoren für die übrigen Vorstellungen neu berechnet wurden. Die konfirmatorische Faktorenanalyse zeigt eine gute Passung des Modells zu den Daten und eine Reliabilität des

Gesamtmodells von $\omega = 0.93$, wobei der Generalfaktor mit $\omega_h = 0.79$ dominant ist, d. h. gegenüber den spezifischen Faktoren (ω_h zwischen 0.20 und 0.43) den Großteil der Gesamtvarianz der Items erklärt. Dennoch zeigen die spezifischen Faktoren hochsignifikante Faktorladungen. Die Faktorlösung für das Bifaktormodell ist in Abb. 2 dargestellt.

Weiterhin wurden die Daten ebenfalls bezüglich des korrekten Konzeptverständnisses ausgewertet und analoge Strukturanalysen durchgeführt. Hierbei wurden nur solche Kombinationen als korrekt („1“) kodiert, die sowohl in der ersten (Antwort) als auch der zweiten Stufe (Begründung) korrekt waren, ansonsten als falsch („0“). Die explorative Analyse zeigte hier mit einem vierfaktoriellen Modell die beste Passung, jedoch keine klar interpretierbare Faktorestruktur, was sich auch in der wiederum hohen Korrelation zwischen den Faktoren zeigt. Die konfirmatorische Analyse mit einem analogen Bifaktormodell (ein Generalfaktor, sechs orthogonale spezifische Faktoren) ergab dagegen auch hier eine gute Passung zu den Daten und eine Reliabilität von $\omega = 0.97$. Der Generalfaktor dominierte mit $\omega_h = 0.87$ wiederum deutlich im Vergleich zu den spezifischen Faktoren mit ω_h zwischen 0.07 und 0.31, welche den zugrundeliegenden Konzepten (z.B. Spannung, Stromstärke, Widerstand) entsprechen.

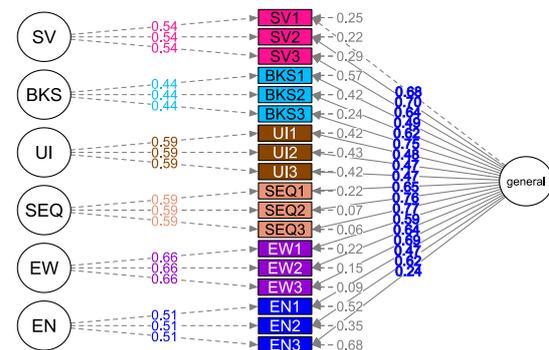


Abb. 2: Faktorlösung des Bifaktormodells bezüglich der Lernendenvorstellungen (eigene Abbildung). Die Faktoren sowie die Items wurden entsprechend der Kürzel der zugrunde liegenden Lernendenvorstellungen benannt (vgl. Abschnitt 2).

5. Zusammenfassung und Ausblick

Die im vorliegenden Beitrag berichteten qualitativen und quantitativen Untersuchungen stützen die Validität des Testinstruments, insbesondere in Bezug auf die in Abschnitt 3 genannten Entwicklungsziele. Die Ergebnisse der Expertenbefragung bestätigen qualitativ die inhaltliche Angemessenheit der Items - sowohl hinsichtlich ihrer Relevanz für die Erfassung des Konzeptverständnisses als auch zur diagnostischen Erfassung der beschriebenen Lernendenvorstellungen. Die quantitativen Evaluationen weisen auf gute psychometrische Eigenschaften des Testinstruments hin, z.B. mit Blick auf die Item-Schwierigkeiten und -trennschärfen sowie die interne Konsistenz des Testinstruments ($\alpha = 0.90$). Die Strukturanalyse mittels

Bifaktormodellen weist – basierend auf signifikanten Faktorladungen und zufriedenstellenden Reliabilitätswerten der Subskalen – darauf hin, dass sowohl die definierten Lernendenvorstellungen bzw. das zugrundeliegende Verständnis einzelner physikalischer Konzepte als latente Konstrukte die Item-Antworten systematisch beeinflussen.

Vor dem Hintergrund, dass Lernendenvorstellungen oftmals als stabile Konstrukte beschrieben werden, wäre es mit Blick auf die weitere Forschung von Interesse zu untersuchen, inwiefern die Sicherheit, mit der Lernende eine entsprechende Vorstellung in der Elektrizitätslehre vertreten, mit der Konsistenz korreliert, mit der die jeweilige Vorstellung über verschiedene Items hinweg vertreten wird. In anderen Inhaltsbereichen wie z.B. dem radioaktiven Zerfall konnte eine solche Korrelation nicht nachgewiesen werden [23].

Das Testinstrument kann bei Interesse an einem Einsatz in Forschung oder Lehre auf Anfrage gerne bei den Autoren angefordert werden.

6. Literatur

- [1] ENGELHARDT, PAULA V. ; GRAY, KARA E. ; REBELLO, N. SANJAY: How Many Students Does It Take Before *We* See the Light? In: *The Physics Teacher* Bd. 42 (2004), Nr. 4, S. 216–221
- [2] MALONEY, DAVID P. ; O’KUMA, THOMAS L. ; HIEGGELKE, CURTIS J. ; VAN HEUVELEN, ALAN: Surveying students’ conceptual knowledge of electricity and magnetism. In: *American Journal of Physics* Bd. 69 (2001), Nr. S1, S. S12–S23
- [3] COHEN, R. ; EYLON, B. ; GANIEL, U.: Potential difference and current in simple electric circuits: A study of students’ concepts. In: *American Journal of Physics* Bd. 51 (1983), Nr. 5, S. 407–412
- [4] MCDERMOTT, LILLIAN C. ; SHAFFER, PETER S.: Research as a guide for curriculum development: An example from introductory electricity. Part I: Investigation of student understanding. In: *American Journal of Physics* Bd. 60 (1992), Nr. 11, S. 994–1003
- [5] STETZER, MACKENZIE R. ; VAN KAMPEN, PAUL ; SHAFFER, PETER S. ; MCDERMOTT, LILLIAN C.: New insights into student understanding of complete circuits and the conservation of current. In: *American Journal of Physics* Bd. 81 (2013), Nr. 2, S. 134–143
- [6] WILHELM, THOMAS ; HOPF, MARTIN: Schüler- vorstellungen zum elektrischen Stromkreis. In: SCHECKER, H. ; WILHELM, T. ; HOPF, M. ; DUIT, R. (Hrsg.): *Schülervorstellungen und Physikunterricht: Ein Lehrbuch für Studium, Referendariat und Unterrichtspraxis*. Berlin, Heidelberg : Springer, 2018 — ISBN 978-3-662-57270-2, S. 115–138
- [7] RHÖNECK, C VON: Vorstellungen vom elektrischen Stromkreis und zu den Begriffen Strom, Spannung und Widerstand. In: *Naturwissenschaften im Unterricht-Physik* Bd. 34 (1986), Nr. 13, S. 10–14
- [8] ENGELHARDT, PAULA VETTER ; BEICHNER, ROBERT J.: Students’ understanding of direct current resistive electrical circuits. In: *American Journal of Physics* Bd. 72 (2004), Nr. 1, S. 98–115
- [9] URBAN-WOLDRON, HILDEGARD ; HOPF, MARTIN: Entwicklung eines Testinstruments zum Verständnis in der Elektrizitätslehre. In: *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften* Bd. Jg. 18 (2012), S. 201–227
- [10] IVANJEK, LANA ; MORRIS, LOUISA ; SCHUBATZKY, THOMAS ; HOPF, MARTIN ; BURDE, JAN-PHILIPP ; HAAGEN-SCHÜTZENHÖFER, CLAUDIA ; DOPATKA, LIZA ; SPATZ, VERENA ; U. A.: Development of a two-tier instrument on simple electric circuits. In: *Physical Review Physics Education Research* Bd. 17 (2021), Nr. 2, S. 020123
- [11] MCDERMOTT, LC ; VAN ZEE, EH: Identifying and addressing student difficulties with electric circuits. In: *Aspects of understanding electricity*, IPN Kiel, Germany (1985), S. 39–48
- [12] RHOENECK, CHRISTOPH VON ; VOELKER, BRUNO: Vorstellungen vom Stromkreis und ihr Einfluss auf den Lernprozess. *Der Physikerunterricht*, 18(2).
- [13] RHÖNECK, C V: Schüleräußerungen zum Begriff der elektrischen Spannung beim Erklären der Meßwerte am Schalter. In: *Naturwissenschaften im Unterricht. Physik/Chemie* Bd. 29 (1981), Nr. 6, S. 210–215
- [14] MAICHLE, U: Schülervorstellungen zu Stromstärke und Spannung. In: *Naturwissenschaften im Unterricht. Physik/Chemie* Bd. 30 (1982), Nr. 11, S. 383–387
- [15] SHIPSTONE, DAVID: Pupils’ understanding of simple electrical circuits. Some implications for instruction. In: *Physics Education* Bd. 23 (1988), Nr. 2, S. 92–96
- [16] SHIPSTONE, D. M.: A study of children’s understanding of electricity in simple DC circuits. In: *European Journal of Science Education* Bd. 6 (1984), Nr. 2, S. 185–198
- [17] SHIPSTONE‡, D. M. ; RHÖNECK, C. V. ; JUNG, W. ; KÄRRQVIST, C. ; DUPIN, J.-J. ; JOHSUA, S. ; LICHT, P.: A study of students’ understanding of electricity in five European countries. In: *International Journal of Science Education* Bd. 10 (1988), Nr. 3, S. 303–316
- [18] SOKOLOFF, DAVID R.: Teaching Electric Circuit Concepts Using Microcomputer-Based Current/Voltage Probes. In: TINKER, R. F. (Hrsg.): *Microcomputer-Based Labs: Educational Research and Standards*. Berlin, Heidelberg :

- Springer Berlin Heidelberg, 1996 — ISBN 978-3-642-61189-6, S. 129–146
- [19] DING, LIN ; CHABAY, RUTH ; SHERWOOD, BRUCE ; BEICHNER, ROBERT: Evaluating an electricity and magnetism assessment tool: Brief electricity and magnetism assessment. In: *Physical Review Special Topics - Physics Education Research* Bd. 2, American Physical Society (2006), Nr. 1, S. 010105
- [20] MCCOLGAN, MICHELE W. ; FINN, ROSE A. ; BRODER, DARREN L. ; HASSEL, GEORGE E.: Assessing students' conceptual knowledge of electricity and magnetism. In: *Physical Review Physics Education Research* Bd. 13, American Physical Society (2017), Nr. 2, S. 020121
- [21] PEŞMAN, HAKI ; ERYILMAZ, ALI: Development of a Three-Tier Test to Assess Misconceptions About Simple Electric Circuits. In: *The Journal of Educational Research* Bd. 103 (2010), Nr. 3, S. 208–222
- [22] HASAN, SALEEM ; BAGAYOKO, DIOLA ; KELLEY, ELLA L: Misconceptions and the Certainty of Response Index (CRI). In: *Physics Education* Bd. 34 (1999), Nr. 5, S. 294–299
- [23] HULL, MICHAEL M. ; JANSKY, ALEXANDRA ; HOPF, MARTIN: Does confidence in a wrong answer imply a misconception? In: *Physical Review Physics Education Research* Bd. 18 (2022), Nr. 2, S. 020108
- [24] LEINER, DOMINIK J.: Too Fast, Too Straight, Too Weird: Post Hoc Identification of Meaningless Data in Internet Surveys. In: *SSRN Electronic Journal* (2013)
- [25] GRIFFARD, PHYLLIS BAUDOIN ; WANDERSEE, JAMES H.: The two-tier instrument on photosynthesis: What does it diagnose? In: *International Journal of Science Education* Bd. 23 (2001), Nr. 10, S. 1039–1052
- [26] JORION, NATALIE ; GANE, BRIAN D. ; JAMES, KATIE ; SCHROEDER, LIANNE ; DiBELLO, LOUIS V. ; PELLEGRINO, JAMES W.: An Analytic Framework for Evaluating the Validity of Concept Inventory Claims. In: *Journal of Engineering Education* Bd. 104 (2015), Nr. 4, S. 454–496
- [27] SCHERMELLEH-ENGEL, KARIN ; GÄDE, JANA C.: Modellbasierte Methoden der Reliabilitäts-schätzung. In: MOOSBRUGGER, H. ; KELAVA, A. (Hrsg.): *Testtheorie und Fragebogenkonstruktion*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2020 — ISBN 978-3-662-61532-4, S. 335–368

Ich bin mittendrin in der Katastrophe

- Ergebnisse aus Interviews mit Schüler:innen
nach dem Besuch des Schülerlabors Labs4Future -

Franziska Beisler*, Jonathan Grothaus*, Thomas Trefzger*

*Lehrstuhl für Physik und ihre Didaktik, Universität Würzburg
franziska.beisler@stud-mail.uni-wuerzburg.de

Kurzfassung

Das Schülerlabor Labs4Future (9. Jgst, 2x6h) an der Universität Würzburg versucht eine Form interdisziplinärer, naturwissenschaftlicher Bildung zu praktizieren, die nicht bei der Wissensvermittlung stehen bleibt, sondern den Lernenden Wege in wirksames Handeln aufzeigt. Doch wie lässt sich dieser Prozess - Klimahandeln und seine Determinanten - beforschen? Neben einer quantitativen Erhebung wurde eine qualitative Evaluation mittels leitfadengestützter Interviews durchgeführt, um subjektive Bedeutungszuschreibungen und Handlungsmuster zu analysieren. Die Ergebnisse zeigen: Trotz in den Fragebögen reduzierter emotionaler Betroffenheit nach dem Besuch des Labs4Future bleibt das Problembewusstsein bestehen – emotionale Abwehrmechanismen wie Verdrängung entstehen als Reaktion auf ein Gefühl der Ohnmacht. Der Artikel betrachtet dieses Phänomen genauer.

Zentrale Methoden des Labs4Future wurden auch an einer Schule in Norwegen durchgeführt, mit anschließenden Interviews in Kleingruppen. Mithilfe der Einzelinterviews werden zentrale Hürden für nachhaltiges Handeln der Jugendlichen herausgearbeitet und durch Aussagen norwegischer Schüler:innen ergänzt. Diese Ergebnisse betonen die Notwendigkeit einer reflexiven, handlungsorientierten Klimabildung, die individuelle und kollektive Handlungsperspektiven eröffnet.

1. Hinführung

Der Klimawandel¹ zählt zu den größten Herausforderungen des 21. Jahrhunderts. Besonders betroffen sind die heutigen Jugendlichen sowie kommende Generationen, die sich mit tiefgreifenden Folgen veränderter Ökosysteme auseinandersetzen müssen (IPCC, 2023). Verzögerungen bei der Umsetzung von Klimaschutzmaßnahmen führen nicht nur zu steigenden Kosten für nachfolgende Generationen, sondern schmälern zugleich die Wirksamkeit zukünftiger Lösungsansätze. In einer bevölkerungsrepräsentativen Umfrage des Umweltbundesamts mit 2073 Teilnehmenden stimmten über 91 % der Befragten mindestens eher der Aussage zu, dass *„jede und jeder Einzelne Verantwortung dafür [trägt], dass wir nachfolgenden Generationen eine lebenswerte Umwelt hinterlassen“* (Umweltbundesamt, 2023, S. 51). Unterlassen wir jetzt wirksames Handeln, drohen die Handlungsspielräume künftiger Generationen drastisch zu schrumpfen – ein Befund, der sich deutlich in den modellierten Temperaturverläufen je nach Emissionsszenario in SPM.1(c) des IPCC Climate Change 2023 Synthesis Report abzeichnet (IPCC, 2023). Bildungseinrichtungen wie Schulen und Hochschulen übernehmen in diesem Kontext eine zentrale Funktion: Sie sollen Jugendlichen systemisches Verständnis vermitteln und zum verantwortungsvollen Handeln befähigen. Im Sinne des Beutelsbacher Konsenses gilt es dabei, das Indoktrinationsverbot strikt zu

beachten und den Lernenden Raum zur eigenständigen Urteilsbildung zu lassen (Hümbert-Schnurr, Grothaus & Wackermann, 2025).

Bildung für nachhaltige Entwicklung (BNE) zielt darauf ab, verantwortungsvolles und zukunftsgerichtetes Handeln zu fördern. Hierzu werden Lernprozesse bewusst mit aktuellen gesellschaftlichen und ökologischen Herausforderungen verknüpft, sodass Bildung nicht nur Wissen vermittelt, sondern selbst zu einem aktiven Bestandteil nachhaltiger Entwicklung wird. Ein wesentlicher Fokus liegt dabei auf der Reflexion des eigenen Handelns im gesellschaftlichen Zusammenhang. Die Bonner Erklärung² unterstreicht, dass BNE Lernende in die Lage versetzen soll, sich mit komplexen globalen Problemlagen – etwa dem Klimawandel, Fragen der Energieversorgung oder sozialer Verwundbarkeit – konstruktiv auseinanderzusetzen und tragfähige Lösungsstrategien zu entwickeln. Diese Zielsetzung erscheint gegenwärtig dringlicher denn je. (Stoltenberg & Burandt, 2014)

Klimakommunikation sowie aktives Klimahandeln sind zentrale Elemente, um gesellschaftliche Transformationsprozesse wirksam mitzugestalten. Eine auf Handlung ausgerichtete Klimabildung vermittelt nicht nur die fachlich-inhaltlichen Grundlagen zur Bewertung klimapolitischer Entwicklungen, sondern fördert darüber hinaus die Fähigkeit, positive

¹ Klimakrise verdeutlicht die Dringlichkeit der Situation besser, stößt (leider) oft auf Abwehrhaltungen.

² Nach der UNESCO-Weltkonferenz Bildung für nachhaltige Entwicklung (BNE) 2009

Zukunftsentwürfe zu konzipieren und als handlungsleitende Motivation zu nutzen. Solche future-scaffolding skills (nach Olivia Levr0ini, 2022) wirken dem Gefühl von Kontrollverlust über die eigene Zukunft entgegen. Nachhaltiges Klimahandeln entfaltet sich auf verschiedenen Ebenen: Es reicht von individuellen alltäglichen Entscheidungen bis hin zu kollektiven, strategisch-politischen Handlungsoptionen. Dabei ist das subjektive Erleben von Selbstwirksamkeit ein zentraler Faktor für die Bereitschaft, aktiv zu werden. (Hümbert-Schnurr, Grothaus & Wacker-mann, 2025)

2. Das Labs4Future

Ein exemplarischer außerschulischer Lernort zum Thema Klimawandel, der neben der Vermittlung von Systemwissen gezielt auch auf die Förderung von Handlungswissen abzielt, ist das Schülerlabor Labs4Future am M!ND-Center der Universität Würzburg. Das Angebot richtet sich primär an Schülerinnen und Schüler der 9. und 10. Jahrgangsstufe, vorwiegend an Gymnasien, und wurde seit seiner Einführung im April 2022 von rund 1000 Lernenden besucht. Inzwischen wurde das Konzept auch an der Ruhr-Universität Bochum implementiert. Neben einer fundierten Wissensvermittlung über Ursachen und Wirkungen des Klimawandels verfolgt das Schülerlabor insbesondere das Ziel, die sogenannte Knowledge-Action-Gap – also die Lücke zwischen Wissen und tatsächlichem Handeln – zu verringern. (Grothaus, Tischer & Terhardt, 2025)

2.1 Ablauf des Labs4Future

Der erste Projekttag fokussiert sich auf die lokale Betroffenheit durch den Klimawandel, die Unterscheidung zwischen Wetter und Klima sowie auf grundlegende naturwissenschaftliche Prozesse wie den Kohlenstoffkreislauf und den Treibhauseffekt (siehe Abbildung 1). Ein Mystery³ dient als strukturierendes didaktisches Element, mithilfe dessen die Lernenden gesammelte Informationen über den Tag hin vernetzen. In Kleingruppen wird das neu gewonnene Wissen mithilfe von Concept Maps visualisiert und am zweiten Tag in Form eines großformatigen Posters weiterentwickelt.

Der zweite Tag widmet sich wirksamen Handlungsoptionen sowie dem Übergang von individueller zu kollektiver und struktureller Verantwortung. Die Lernenden durchlaufen verschiedene thematische Stationen zu den Bereichen Wohnen, Mobilität und Konsum. Am Nachmittag kommt die Methode der Treibhaustaler⁴ zum Einsatz, mit der die Emissionsrelevanz verschiedener Lebensbereiche quantifizierbar und vergleichbar gemacht wird. Den Abschluss bildet eine moderierte Zukunftswerkstatt, in der konkrete gesellschaftliche und politische Lösungsperspektiven gemeinsam erarbeitet, diskutiert und im



Rollenspiel gegenüber Klimaschutzbremsenden verdeutlicht werden. (Grothaus, Tischer & Terhardt, 2025)

Abb. 1: Stationen im Labs4Future, Tag I in lila, Tag II in braun. Eigene Darstellung mit Bildern von J. Grothaus & A. Herold.

Fundierte Klimabildung basiert auf der Vermittlung dreier zentraler Wissensbereiche: Systemwissen, Handlungswissen und Effektivitätswissen.

Systemwissen bezieht sich auf die grundlegenden naturwissenschaftlichen Zusammenhänge im Erdsystem – etwa den Treibhauseffekt, den Kohlenstoffkreislauf oder die Eis-Albedo-Rückkopplung. Hierbei gilt es, bestehende Alltagsvorstellungen der Lernenden zu berücksichtigen, die das Verständnis wissenschaftlicher Konzepte mitunter erschweren. Zusätzlich wird thematisiert, wie sich das Klima innerhalb der Lebensspanne der heutigen Generation abhängig von unterschiedlichen Emissionspfaden entwickeln kann.

Handlungswissen umfasst Kenntnisse darüber, welche Maßnahmen auf individueller sowie gesellschaftlicher und politischer Ebene zur Reduktion von Treibhausgasemissionen beitragen können. Dabei wird deutlich, dass kollektive und strukturelle Maßnahmen in der Regel eine deutlich höhere Wirksamkeit entfalten als rein individuelles Engagement.

Effektivitätswissen befähigt zur Einschätzung, wie wirkungsvoll bestimmte Maßnahmen, Technologien und politische Strategien tatsächlich sind. Zwar können individuelle Verhaltensänderungen – etwa im Bereich Ernährung, Konsum oder Mobilität – positive Beiträge leisten, doch bleiben gesellschaftliche Gesamtemissionen maßgeblich von bestehenden institutionellen und infrastrukturellen Rahmenbedingungen abhängig.

Aus diesen drei Wissensdimensionen werden im Labs4Future vier übergeordnete Lernzieldomänen abgeleitet:

- Erdsystemwissen
- Wissen zur Wechselwirkung von Mensch und Klima

³ <https://go.uni-wue.de/postermystery>

⁴ <https://padlet.com/jonathanGrothaus/treibhaustaler>

- Wissen zur Wechselwirkung zwischen Individuum und gesellschaftlichem System im Bezug auf Treibhausgasemissionen
- Wissen über sozial-ökonomische Transformationsstrategien

Ziel ist es, ein tiefgreifendes Verständnis für die Komplexität des Klimawandels zu fördern und individuelle sowie kollektive Handlungsoptionen auf unterschiedlichen Ebenen zugänglich zu machen. Die einzelnen Stationen des Schülerlabors (vgl. Abbildung 1) greifen dabei jeweils mindestens eine dieser vier Lernzieldomänen auf. (Grothaus, Tischer & Terhardt, 2025; Hümbert-Schnurr, Grothaus & Wackermann, 2025)

2.2 Theoretische Fundierung des Labs4Future

Die konzeptionelle Ausgestaltung der Methoden und Lernprozesse im Labs4Future basiert auf dem Framework Lessons4Action (Abbildung 2), das umweltsychologische, soziologische und kommunikationswissenschaftliche Erkenntnisse integriert und für Bildungsprozesse nutzbar macht. Ziel ist es, Handlungsbereitschaft auf drei zentralen Ebenen zu fördern: im individuellen Verhalten, in der Akzeptanz politischer Maßnahmen und in der aktiven gesellschaftlichen Partizipation. (Grothaus et al., 2024)

Damit Handlungsimpulse auf diesen Ebenen wirksam werden können, beschreibt das Framework einen vermittelnden Pfad vom Wissen zum Handeln. Dieser verläuft über individuell geprägte Vorerfahrungen, emotionale Reaktionen und habitualisierte Verhaltensmuster der Lernenden. Inhaltliche wie soziale Erfahrungen beeinflussen dabei maßgeblich, inwieweit neues Wissen an bereits vorhandene kognitive Strukturen anschlussfähig ist. Emotionen regulieren Motivation und Hemmung beim Lernen und Handeln; etablierte Gewohnheiten wirken besonders stark auf die Umsetzung von Handlungswissen im Alltag.

Zentral für die Aktivierung von Handlungsbereitschaft ist laut Lessons4Action die Ansprache mindestens eines psychologischen Zugangs. Dazu zählen die individuelle Betroffenheit, das Problembewusstsein, das Empfinden von Gerechtigkeit sowie die Übernahme von Verantwortung. Die methodische Gestaltung der Lernumgebung sollte folglich mindestens einen dieser Zugänge adressieren. Darüber hinaus identifiziert das Framework drei entscheidende Einflussfaktoren für tatsächliche Handlungsintentionen:

- die Wirksamkeitserwartung – also die Überzeugung, dass eigenes Handeln Veränderungen bewirken kann,
- die individuelle Einstellung sowie
- gesellschaftliche Normen oder Erwartungshaltungen.

Ob eine intendierte Handlung tatsächlich umgesetzt wird, hängt letztlich von den konkreten, situativen Rahmenbedingungen ab. (Hümbert-Schnurr, Grothaus & Wackermann, 2025)

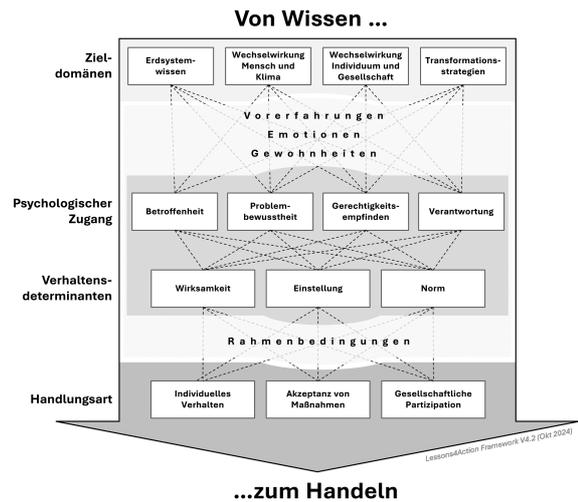


Abb. 2: Lessons4Action Framework – Wege vom Systemwissen zum Handeln in drei Facetten (aus Hümbert-Schurr, Grothaus & Wackermann, 2025).

Zahlreiche methodische Bausteine des Labs4Future sind entlang dieses theoretischen Rahmens konzipiert – etwa das Mystery, die Zukunftswerkstatt oder die Methode der Treibhaustaler. Letztere wird hier exemplarisch im Rahmen des Lessons4Action-Modells verortet: Nach dem ersten Projekttag und dem Mystery, das einen emotionalen Bezug zur eigenen Zukunft herstellt, wird bei vielen Lernenden ein Gefühl der Betroffenheit erzeugt. Die Treibhaustaler-Methode – ein interaktives Emissionspuzzle mit Alltagsbezug – setzt an diesem Betroffenheitsgefühl an. Sie veranschaulicht, welche alltäglichen Verhaltensweisen besonders emissionsintensiv sind, erlaubt direkte Vergleiche mit emissionsärmeren Alternativen und macht auch strukturelle Einflussfaktoren sichtbar und greifbar. Damit stärkt sie die Wirksamkeitserwartung sowohl individueller als auch systemischer Veränderungen – eine zentrale Voraussetzung für Handlungsbereitschaft und die Akzeptanz von Klimaschutzmaßnahmen.

Die Entscheidung, ob eine Verhaltensanpassung im Alltag erfolgt, verbleibt selbstverständlich bei den Lernenden selbst – oder, je nach Alter, bei ihren Erziehungsberechtigten. Bereits die bewusste Auseinandersetzung mit alternativen Verhaltensoptionen durch den Austausch von emissionsreichen gegen emissionsarme Puzzleteile markiert jedoch einen ersten kognitiven Schritt hin zu nachhaltigem Handeln. Auch die Wahl eines alternativen, kleineren Talerplättchens kann in diesem Sinne als erste individuelle Handlungsentscheidung interpretiert werden.

Im systemischen Verständnis entsteht nachhaltiges Handeln weniger durch äußeren Zwang als durch sogenannte Perturbationen – also Störungen bestehender Kommunikations- und Handlungsmuster. Diese können Impulse für Veränderung liefern, wenngleich die Reaktion des Systems nicht vorhersehbar ist: Gesellschaften tendieren zur Selbststabilisierung durch bestehende Strukturen. Der Effekt solcher Impulse kann sich im individuellen Verhalten, in der

politischen Akzeptanz oder in verstärkter gesellschaftlicher Partizipation zeigen. Die Wirkung dieser Störungen ist jedoch abhängig von vielfältigen Einflussfaktoren wie Alter, Persönlichkeit, Gruppenzugehörigkeit oder kulturellem Kontext. Gerade in der späten Adoleszenz gewinnen Themen wie Identitätsfindung, Autonomie und Sinnorientierung an Bedeutung. Jugendliche beginnen zunehmend, ihre Handlungsoptionen unabhängig von gruppenspezifischen Erwartungen zu reflektieren und auf ihre gesellschaftliche Rolle zu beziehen. Bildungsprozesse sollten deshalb nicht nur individuelles Verhalten, sondern insbesondere kollektives Handeln und strukturelle Veränderungen thematisieren – so, wie es exemplarisch die Zukunftswerkstatt oder die Treibhaustaler-Methode durch die Integration gesellschaftlicher Emissionsquellen (Plättchen „öffentliche Emissionen“) leisten (Hümbert-Schnurr, Grothaus & Wackermann, 2025).

3. Struktur und Fragestellungen der qualitativen Evaluation des Labs4Future

Das Bildungsformat Labs4Future ist Bestandteil einer umfassenden Studie, die den Prozess vom Wissen zum Handeln im Kontext der Klimakrise untersucht. Neben einer quantitativen Evaluation durch Jonathan Grothaus, die mittels Pre-, Post- und Follow-up-Test durchgeführt wurde, kam ergänzend qualitative Forschung zum Einsatz: acht leitfadengestützte Einzelinterviews, die zwischen Dezember 2023 und März 2024 durchgeführt wurden.

Die quantitative Erhebung erfasst im Pre-Test verschiedene Dimensionen wie Wissen zum Klimawandel, Einstellungen zur Umwelt, Hoffnung zum Klimawandel und Klimaangst sowie die soziale Erwünschtheit und andere unabhängige Variablen. In Post- und Follow-up-Befragungen werden zentrale Bereiche – Wissen, Einstellungen, Hoffnung und Klimaangst – erneut abgefragt, um Veränderungen im Zeitverlauf sichtbar zu machen.

Zur vertiefenden Analyse und zur Kontextualisierung quantitativer Ergebnisse wurde eine qualitative Erhebung hinzugezogen. Diese orientiert sich methodisch am Vorgehen von Udo Kuckartz (2008). Der Ansatz ermöglicht es, über statistische Kennzahlen hinaus, subjektive Bedeutungszuschreibungen und komplexe Wirkzusammenhänge zu erfassen. Durch die Offenheit qualitativer Verfahren können zudem Faktoren identifiziert werden, die im Vorfeld nicht antizipiert oder theoretisch abgebildet wurden. Damit leisten sie einen essenziellen Beitrag zu einer realitätsnahen, differenzierten Wirkungserfassung. (Kuckartz et al., 2008)

Die Interviews dienen insbesondere dazu, Ergebnisse der quantitativen Evaluation zu ergänzen und potenzielle Erklärungsmuster für unerwartete Resultate zu identifizieren. Erste Impulse für eine qualitative Auseinandersetzung mit dem Labs4Future stammen aus der 2022 eingereichten Masterarbeit von Paul

Neumaier. Auf Basis seiner Vorarbeit wurde der ursprünglich entwickelte Interviewleitfaden inhaltlich erweitert, strukturell überarbeitet und methodisch weiterentwickelt. Eine zentrale Neuerung bestand in der Integration gezielter kognitiver Impulse (Prompts in Form von Bildern und Zitaten), um die Reflexion der Interviewten anzuregen und das Gespräch dynamischer zu gestalten.

Zur Orientierung diente den Interviewenden ein grober Interviewverlauf, der – ergänzend zum ausgearbeiteten Leitfaden – als strukturierende Übersicht fungierte und die jeweilige Position im Interviewverlauf verdeutlichte. Der Verlauf gliedert sich in fünf thematische Bereiche:

- a) Erinnerungen an den Besuch des Labs4Future
 - Wahrgenommene Wirkung auf die Klasse und das eigene Verhalten
 - besonders in Erinnerung gebliebene Inhalte und überraschende Informationen
 - Wahrgenommener Einfluss des Labs4Future auf das eigene Wissen zum Klimawandel
- b) Erfahrungen aus dem Freundes- und Familienkreis
 - Gespräche über das Labs4Future
 - Wahrgenommene Einstellungen im sozialen Umfeld
 - Bisherige Konfrontationen mit Klimaschutzbremsenden
- c) Gesellschaftliche Ebene des Handelns
 - Wahrnehmung von Schuld und Verantwortung
 - Einschätzung eigener Einflussmöglichkeiten und wirksamer Maßnahmen auf versch. Ebenen
 - Reflexion über politische Maßnahmen
- d) Individuelle Intentionen und Emotionen
 - emotionale Reaktionen auf die Klimakrise
 - persönliches Klimahandeln, Motivationen
 - Wahrgenommene Hindernisse am Klimahandeln
- e) Zukunftsperspektiven
 - Einschätzung eigener Handlungsfähigkeit
 - Einfluss der Klimakrise auf die eigene Zukunftsvorstellung

Durch diese mehrstufige Anlage wurde ein vielschichtiges Bild der Wirkung des Labs4Future und des persönlichen Bildes zum Klimawandel gezeichnet, das sowohl individuelle als auch soziale und strukturelle Ebenen einbezieht. Für die Evaluation waren im Vorhinein folgende Fragestellungen geplant:

- Wie reflektieren die Lernenden das Labs4Future?
- Verändert das Labs4Future die Handlungsbereitschaft und das Handeln von Lernenden?

Weitere Fragestellungen (wie die Kernfragestellung dieses Artikels) ergaben sich später aus der Betrachtung der quantitativen Daten - hier werden die bereits ausgewerteten Interviews nun herangezogen, um Beobachtungen zu begründen.

Zur systematischen Vergleichbarkeit der Interviewaussagen wurden sämtliche Transkripte anhand eines sowohl deduktiv als auch induktiv entwickelten Kategoriensystems kodiert. Insgesamt kamen 20 Hauptkategorien zur Anwendung, die auf Grundlage des Interviewleitfadens, des Frameworks und der Evaluationsfragestellungen entwickelt und in besonderer Weise an umweltspsychologische Einflussfaktoren – etwa Emotionen, Betroffenheit oder Handlungsintentionen – angelehnt sind.

Nach der Kodierung der ersten beiden Interviews wurde das ursprüngliche Kategoriensystem überarbeitet und sprachlich präzisiert, um eine höhere inhaltliche Trennschärfe und Konsistenz in der Anwendung zu gewährleisten. Die vollständige Übersicht der Haupt- und Subkategorien ist grafisch in Abbildung 3 dargestellt. Eine vertiefende Beschreibung der einzelnen Kategorien erfolgt tabellarisch in der Abschlussarbeit von Franziska Beisler: Für jede Kategorie werden dort Bezeichnung, Definition, Kodierkriterien (inkl. Abgrenzungskriterien) sowie exemplarische Textstellen aufgeführt.

Ein zentraler Aspekt der kategorienbasierten Auswertung ist die Analyse der Themen, die von den Interviewten eigeninitiativ eingebracht wurden. Hierzu wurde die qualitative Datenanalyse-Software MAXQDA eingesetzt. Die Software ermöglichte eine strukturierte Kodierung der Interviewabschnitte entsprechend der entwickelten Kategorien und unterstützte sowohl die Häufigkeitsanalyse als auch die Visualisierung der Daten.

Die Häufigkeit der Kodierungen wurde unter anderem mithilfe von Codewolken (vergleichbar mit Wortwolken) veranschaulicht. Darüber hinaus wurde der sogenannte Code-Matrix-Browser (CMB) genutzt, um aufzuzeigen, welche Subkategorien innerhalb eines Interviews gemeinsam vorkamen und von welchen Personen bestimmte Themencluster thematisiert wurden. Auch hier wurde die relative Häufigkeit der Nennungen berücksichtigt.

4. Verknüpfung quantitativer Resultate mit der qualitativen Evaluation des Labs4Future

Ein Aspekt der quantitativen Evaluation im Rahmen dieser Untersuchung ist die Veränderung der wahrgenommenen Risikowahrscheinlichkeit durch den Klimawandel. Zur Erfassung wurde ein neunteiliges Itemset mit einer siebenteiligen Likert-Skala verwendet, die Items wurden aus der PACE-Studie (Lehrer et al., 2024) entnommen:

„Bitte gib jeweils an, wie wahrscheinlich diese Folgen des Klimawandels in deinem Leben auftreten.“

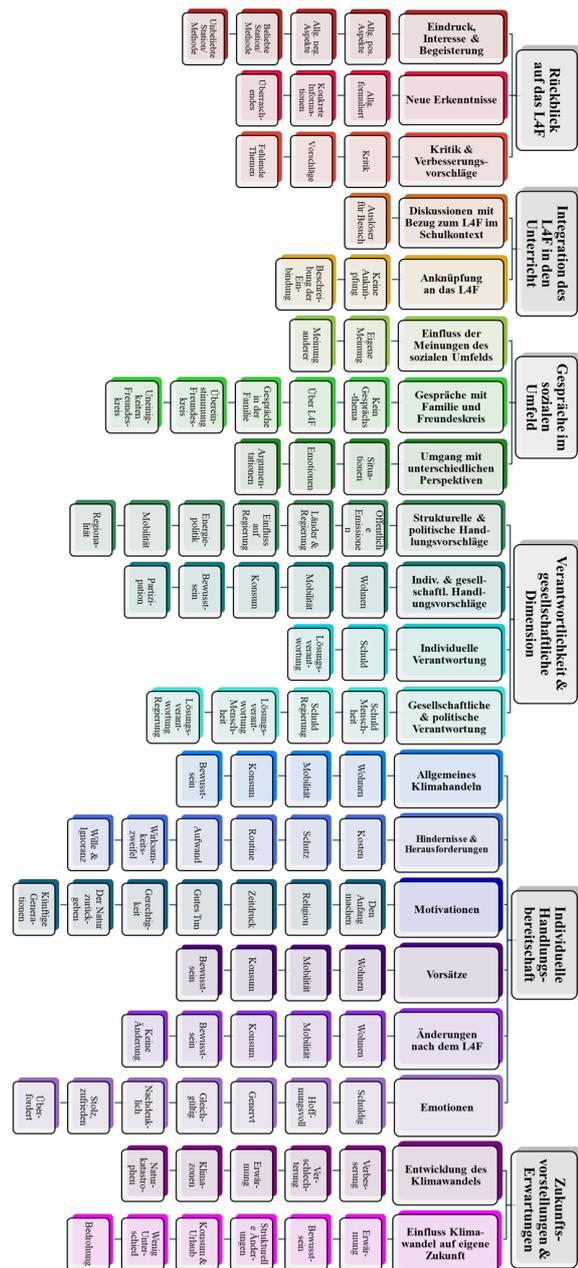


Abb. 3: Verwendetes Kategoriensystem zur Auswertung der Interviews. Eigene Darstellung.

- *Ausbreitung von Krankheitsüberträgern (z.B. Mücken oder Zecken)*
- *Extremwetterereignisse*
- *Zunehmende Hitze und Hitzewellen*
- *Luftverschmutzung*
- *Verunreinigtes Wasser*
- *Niedrige Lebensmittelqualität (z.B. durch einen sinkenden Nährstoffanteil)*
- *Zunehmende Allergene und vermehrter Pollenflug*
- *Psychische Probleme (z.B. Traumata oder Depressionen)*
- *Gesellschaftliche Folgen (z.B. Konflikte oder Migration)“*

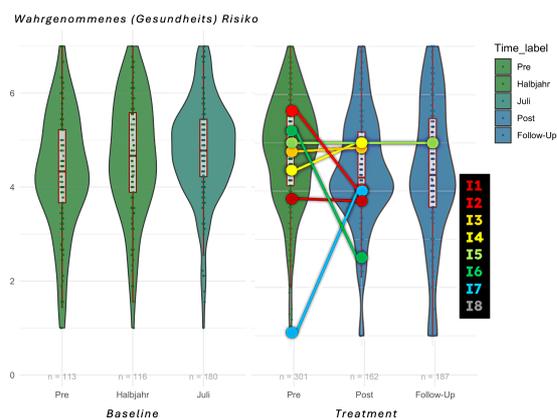


Abb. 4: Violin Plots der quantitativen Ergebnisse des wahrgenommenen Risikos: links Baseline, rechts Labs4Future-Intervention mit Verortung der Interviewten in den quantitativen Daten. Eigene Darstellung.

Die Ergebnisse zeigen bei den Teilnehmenden, die an einer Labs4Future-Intervention teilgenommen haben, einen deutlichen Rückgang der wahrgenommenen Bedrohung zwischen Pre- und Posttest (Pretest: $n=301$; Posttest: $n=162$). Im Gegensatz dazu lassen sich in den Kontrollgruppen (Pretest: $n=113$; Folgetest: $n=116$) keine vergleichbaren Veränderungen beobachten. Abbildung 4 zeigt die Violin Plots dieser Daten. Es ergibt sich direkt folgende qualitative Forschungsfrage:

„Wie lässt sich der Rückgang der subjektiv empfundenen Betroffenheit und Risikowahrnehmung nach dem Labs4Future erklären?“

Zunächst stellt sich die Frage, ob dieser Rückgang auf eine Gruppenverschiebung (z. B. systematische Abwanderung besonders betroffener Schüler:innen) zurückzuführen ist oder auf breitere, inhaltlich erklärbare Veränderungen. Eine vertiefte quantitative Analyse liegt außerhalb dieses Rahmens; daher erfolgt die Einordnung exemplarisch anhand derjenigen Interviewpersonen, bei denen die Wanderung von einem mittleren bis hohen Risikoempfinden zu einem weniger starken Risikoempfinden in den quantitativen Daten gefunden wurde. Auffällig ist eine markante Abnahme der Betroffenheit bei den Interviewten I2 und I6. Beide lagen im Pretest im Bereich des Modus und bewegten sich im Posttest jeweils in Richtung geringerer Betroffenheit – I2 hin zum neuen Häufungspunkt, I6 sogar deutlich darunter. Ein gegenläufiges Muster zeigt I7: Von keiner wahrgenommenen Betroffenheit im Pretest hin zum neuen Häufungspunkt im Posttest. Im Folgenden liegt der Fokus auf der Abnahme der Betroffenheit, insbesondere bei I2 und I6.

Betroffenheit stellt ein komplexes Zusammenspiel kognitiver und emotionaler Komponenten dar. Es liegt daher nahe, die kodierten emotionalen Reaktionen der Interviewten in die Interpretation einzubeziehen. Gleichgültigkeit war über alle Interviews hinweg die am häufigsten kodierte Emotion (siehe Abbildung

5) – und wurde sowohl bei I2 als auch bei I6 identifiziert. Die einzige weitere Person mit dieser Kodierung ist I8; hier liegen jedoch keine hinreichend aussagekräftigen quantitativen Daten zur Verortung vor.

Trotz der Kodierung „gleichgültig“ zeigen I2 und I6 zugleich ein Bewusstsein für die Realität und Relevanz des Klimawandels. Dies wirft die Frage auf, wie sich emotionale Gleichgültigkeit und inhaltliche Bewusstheit miteinander vereinbaren lassen. Ein Zitat von I6 bietet hier einen aufschlussreichen Einblick:

„Ich bin mittendrin in der Katastrophe. Und natürlich will kein Mensch in der Katastrophe sein. Deswegen versucht man das so ein bisschen wegzuschieben. So ein bisschen zu denken, ja, ist mir eigentlich auch egal. [...] Das macht mir jetzt nichts mehr.“
(I6, Pos. 64)

Die Interviewte beschreibt damit eine aktive Verdrängung als Coping-Strategie, um mit der als ausweglos empfundenen Krisensituation umzugehen. Diese Haltung wird im späteren Verlauf des Interviews nochmals konkretisiert – etwa im Zusammenhang mit einem ausgeprägten Gefühl mangelnder Selbstwirksamkeit:

„Ich fühle mich so, als würde ich ersticken. [...] Man fühlt sich so kleingemacht, weil man nicht so viel [tun kann]. [...] Ich versuche einfach, nicht so viel daran zu denken.“
(I6, Pos. 132–134)

Auch bei I2 zeigt sich eine ähnliche Tendenz: So bezeichnet er es als „absurd“, wegen des Klimawandels stark emotional zu reagieren (Pos. 128–134), obwohl er etwa in Pos. 40 klare klimatische Veränderungen – etwa Temperaturanstiege und Verschiebungen von Klimazonen – benennt. I8 äußert in Pos. 128 ausdrücklich, sich nicht betroffen zu fühlen, während er in Pos. 106 zugleich feststellt, dass ein Rückgang des Klimawandels aus seiner Sicht ausgeschlossen sei.

Die Interviews zeigen somit ein zentrales Ergebnis: Die reduzierte Betroffenheit ist nicht gleichzusetzen mit einem mangelnden Problembewusstsein. Vielmehr existiert bei allen betrachteten Personen ein paralleles Bewusstsein für die Folgen des Klimawandels, das jedoch emotional abgewehrt oder rationalisiert wird. Besonders bei I6 lässt sich dies als Coping-Mechanismus im Umgang mit einer empfundenen emotionalen Überforderung einordnen – verstärkt durch ein Gefühl der Ohnmacht im Hinblick auf mögliche Handlungsoptionen.



Abb. 5: Relative Häufigkeit der kodierten Emotionen in einer Codewolke. Eigene Darstellung, erstellt mit MAXQDA.

Codesystem	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8
Individuelle Handlungsbereitschaft								
Emotionen im Kontext des Klimas								
gleichgültig		•				•		•
Zukunftsvorstellungen und Erwartun								
Einschätzung zur zukünftigen Ent								
Erwärmung				•	•			•
Klimazonenverschiebung		•						
Verbesserung			•	•		•	•	
Verschlechterung		•	•	•			•	•
Naturkatastrophen			•					
Einschätzung zum Einfluss des Kl								
Erwärmung		•			•		•	
Bedrohung		•			•	•	•	

Abb. 6: Vergleich der Interviewten: Auszug aus dem Code-Matrix-Browser zur Gleichgültigkeit und der Erwarteten Entwicklung des Klimawandels. Eigene Darstellung, erstellt mit MAXQDA.

5. Was hindert die interviewten Jugendlichen am Klimahandeln?

Alle Interviewten haben mindestens eine mögliche Verschlechterung des Klimawandels in Zukunft oder eine Bedrohung ihrer eigenen Zukunft angesprochen (siehe Abbildung 6) – die meisten unter ihnen handeln aber eher selten bewusst klimafreundlich im Alltag. Welche Hürden des Klimahandelns sind ihnen bewusst?

Die von den Jugendlichen benannten Hindernisse und Herausforderungen decken sich weitgehend mit bekannten theoretischen Annahmen darüber, was klimagerechtes Handeln erschweren kann. Es ist bemerkenswert, dass viele Interviewte offen über individuelle und gesellschaftliche Barrieren reflektieren. Folgende zwei Zitate verdeutlichen dies:

„Weil wie gesagt, es gibt diese Leute, die denken, die anderen können das machen, dann brauche ich das nicht zu machen, das ist auch ein großes Problem auf jeden Fall.“ (I5, Pos. 119)

Ironischerweise bemerkte dieselbe Person im Interviewverlauf, dass sich ihr eigenes Verhalten durch die Teilnahme an Labs4Future nicht verändert habe. I6 spricht direkt strukturelle Hürden und ein Ohnmachtsgefühl an:



Abb. 7: Relative Häufigkeit der kodierten Hindernisse des Klimahandelns in einer Codewolke. Eigene Darstellung, erstellt mit MAXQDA

„[...] Ich entscheide meine Taten. Aber so höhere Sachen, da kann ich ja, bin ja nicht mit drin und sagen so, ja ich möchte das und das und wir sollten das so machen. Ich habe da keine Stimme. Mit wem soll ich da reden? [...] Ich kann die ja nicht anrufen oder so. Deswegen ist mir egal. Die sollen das machen, die Oberen. Ja.“ (I6, Pos. 114)

Die Auswertung aller kodierten Interviewausschnitte ergibt folgende zentrale Subkategorien in absteigender Nennungshäufigkeit (siehe auch Abbildung 7):

- a) Wille und Ignoranz (I3, I4, I5, I6, I8)
 - Bequemlichkeit und Komfort (I3, Pos. 6; I4, Pos. 108): Nachhaltiges Verhalten wird teilweise als unkomfortabel oder einschränkend empfunden. Die Bereitschaft zum Verzicht auf klimaschädliche Annehmlichkeiten wie Flugreisen ist gering.
 - Verantwortungsabgabe an Politik und „die Oberen“ (I5, Pos. 68; I6, Pos. 114): Einige Jugendliche sehen die Verantwortung primär bei politischen Entscheidungsträger:innen oder „den Größeren“. Das eigene Handeln erscheint ihnen im Vergleich machtlos.
 - Komplexität und mangelnde Auseinandersetzung (I5, Pos. 115; I8, Pos. 100): Der Klimawandel wird als komplexes, schwer verständliches Thema wahrgenommen, das im Alltag häufig ausgeblendet wird.
 - Sozialer Einfluss und Mitläufereffekt (I5, Pos. 115): Klimafreundliches Verhalten wird oft erst dann als sinnvoll erachtet, wenn es von anderen (insbesondere im engen Umfeld) vorgelebt wird. Fehlen solche Vorbilder, kommt es zu Passivität.
 - Resignation (I8, Pos. 64): Ein Gefühl der Aussichtslosigkeit führt dazu, dass manche Jugendliche den Klimawandel als unlösbar betrachten und deshalb nicht aktiv werden.
- b) Wirksamkeitszweifel (I1, I2, I6)
 - Es herrscht die Überzeugung, dass eine einzelne Person kaum etwas bewirken kann (I1, Pos. 37 & 63; I6, Pos. 30). Der Gedanke, dass individuelles Verhalten keinen spürbaren Einfluss hat, führt dazu, dass Klimaschutzmaßnahmen als „unnötig“ (I1, Pos. 63) oder wirkungslos empfunden werden. Diese Überzeugung

geht häufig mit der Einschätzung einher, dass strukturelle Veränderungen notwendig seien und persönliches Engagement allein unzureichend sei – insbesondere so lange wahrgenommene große Emittenten wie China oder Russland nicht mitziehen (I6, Pos. 56). Emissionen pro Kopf werden dabei nicht reflektiert.

c) Aufwand (I1, I2, I3, I5)

Hier werden klimafreundliche Ernährung (I2, Pos. 18), öffentlicher Nahverkehr (I3, Pos. 100) und Alltagsauglichkeit (I1, Pos. 41) angeführt:

Eine fleischlose Ernährung wird von I2 als aufwendig und kompliziert wahrgenommen – insbesondere wenn Nahrungsergänzungsmittel notwendig werden. Der ÖPNV wird in Interview 3 als zeitintensiv und unkomfortabel beschrieben. Die Aussicht, später auf das Auto umzusteigen, erscheint daher realistisch (I3, Pos. 112). In praktischen Alltagssituationen entscheiden sich Jugendliche laut Interview 1 oftmals gegen die klimafreundlichere Option; über den Klimaaspekt wird meist gar nicht nachgedacht.

d) Geringes Interesse (I1, I6, I8)

Fehlende Relevanzzuschreibungen erschweren aktives Handeln: „*Ich glaube, es liegt einfach daran, dass [...] wir daran nicht so Interesse [haben]*“ (I6, Pos. 30). Extremere Protestformen wie Straßenblockaden wirken darüber hinaus abschreckend: „*Wenn die sich auf die Straße so kleben, weil dann, meiner Meinung nach, löst das Wut in den Leuten aus. [...] Der Wut führt einfach zu mehr Desinteresse*“ (I8, Pos. 120).

Außerdem wurden auch etablierte Alltagsroutinen als Hindernisse für Verhaltensänderungen angesprochen (I3, Pos. 92; I4, Pos. 94) und der Kostenfaktor nachhaltiger Produkte thematisiert (I5, Pos. 68; I6, Pos. 120). Preisunterschiede zwischen konventionellen und nachhaltigen Produkten wirken abschreckend, auch wenn das Umweltbewusstsein vorhanden ist.

6. Ergänzende Aussagen norwegischer Schüler:innen

In diesen Hindernissen steckt (mindestens) ein Punkt, der für die Klimabildung besonders relevant ist: Die Bedeutung von Gruppendynamiken und Vorbildern, der sich im Vergleich mit einer Durchführung des Labs4Future-Programms in Norwegen zeigt:

In Stavanger (Norwegen) wurden an der Grødem skole Randberg eintägige Workshops zum Klimawandel mit drei 10. Klassen durchgeführt. Diese Workshops verwendeten Materialien und zentrale Methoden des Labs4Future, wie das Mystery und die Treibhaustaler, legten den Fokus aufgrund des begrenzten Zeitrahmens aber eher auf Handlungs- als auf Systemwissen. Zum Abschluss jedes Workshop-tages wurden Gruppendiskussionen (3-6 Personen) mit vorgegebenen Fragen geführt. Bei vier Gruppen hatten wir die Möglichkeit, die Diskussion aufzuzeichnen, um sie später mit einem ähnlichen Kategoriensystem wie für die Einzelinterviews

auszuwerten. Ein Zitat zeigt dabei ganz deutlich, dass es ein zentrales Ziel von Klimabildung sein sollte, Jugendliche dabei zu unterstützen, sich gegenseitig zu motivieren:

“People is [sic!] influenced by other people.

Like the people you hang out with,

that's the person you become.

So you get influenced by your friends.

And for example, if I have a group of friends that does not take actions in climate change, that means that I will not be that kind of person.

So I think we need to motivate each other and to spread the message for people to understand how serious it is.”

(I2A Stav, Pos. 182)

Soziale (Erwartungs-)Normen stellen im Framework Lessons4Action einen zentralen Einflussfaktor für klimarelevanten Verhalten dar. Sie entstehen im Zusammenspiel individueller Einstellungen mit den wahrgenommenen Erwartungen anderer – sowohl im direkten sozialen Umfeld (z. B. Freundeskreis, Schulklasse) als auch im weiteren gesellschaftlichen Kontext oder Inhalte auf sozialen Plattformen wie TikTok.

Ein anschauliches Beispiel für die weit reichende Wirkung sozialer Normen zeigt sich im anekdotischen Vergleich zwischen Schüler:innen der Grødem skole und Teilnehmenden des Labs4Future in Würzburg. Insbesondere im Bereich der Ernährung treten markante Unterschiede zutage: Während in mehreren Würzburger Schulklassen ganze Freundesgruppen eine vegetarische Ernährung praktizieren oder zumindest anstreben, gab in den norwegischen Klassen lediglich eine Person an, sich vegetarisch zu ernähren – und auch er wählte im Rahmen der Treibhaustaler-Plättchen später das Plättchen für eine fleischbasierte Ernährung. Besonders auffällig war zudem die Reaktion auf das Thema Tofu: Obwohl Tofu in norwegischen Supermärkten erhältlich ist, mussten wir in sämtlichen Klassen mehrfach erklären, was Tofu überhaupt ist. In Schulklassen aus Würzburg und Umgebung ist dieser Begriff hingegen allgemein bekannt und bedarf üblicherweise keiner weiteren Erläuterung.

Diese Beobachtungen veranschaulichen, wie stark soziale Normen das klimabezogene Verhalten junger Menschen beeinflussen können. Abhängig von der Zusammensetzung und der kulturellen Prägung der jeweiligen Peer-Group können sie entweder fördernd oder hemmend auf klimafreundliches Verhalten wirken. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, gezielt positive soziale Normen zu stärken – beispielsweise durch schulische Bildungsangebote oder gemeinschaftliche Erfahrungsräume –, um nachhaltiges Handeln langfristig zu unterstützen und zu verankern.

7. Fazit

Die Ergebnisse der qualitativen Evaluation des *Labs4Future*-Projekts zeigen, dass fundierte Klimabildung mehr leisten muss als reine Wissensvermittlung. Zwar verfügen viele Jugendliche nach der Teilnahme über ein Verständnis zentraler Klimazusammenhänge, doch die Bereitschaft zum Handeln ist stark abhängig von emotionalen, sozialen und strukturellen Einflussfaktoren. Gefühle von Ohnmacht und mangelnder Selbstwirksamkeit können zu emotionaler Abwehr oder Resignation führen – trotz vorhandenem Problembewusstsein. Um diesen Mechanismen wirksam zu begegnen, bedarf es einer Bildung, die gezielt auf motivationale Zugänge, positive Handlungserfahrungen und kollektive Lösungsstrategien setzt. Die qualitative Evaluation unterstreicht auch, wie stark soziale Dynamiken, Vorbilder im Umfeld und digitale Medien die Handlungsmotivation beeinflussen. Klimabildung muss daher nicht nur Wissen strukturieren und reflektieren, sondern auch emotionale Zugänge ermöglichen und Räume für soziale Wirksamkeitserfahrungen schaffen. Gerade vor dem Hintergrund der Dringlichkeit der Klimakrise ist es essenziell, Lernende zur aktiven Teilhabe an gesellschaftlicher Transformation zu befähigen.

“Take action, no excuses.
Just do something that's good for the climate.”
(I2A Stav, Pos. 259)

8. Literatur

- Beisler, F. (2025). *Qualitative Evaluation des Labs4Future und Konzeption anknüpfender lösungsorientierter Unterrichtsmaterialien zum Klimawandel*. (Schriftliche Hausarbeit im Rahmen der ersten Staatsprüfung für Lehramt an Gymnasien). Universität Würzburg.
- Grothaus, J., Elsholz, M., Weirauch, K., Gerstner, S., Geidel, E., Hennecke, M., Siller, H.-S., & Trefzger, T. (2024). Kristallisationskeim für Lehren und Lernen zur Klimakrise. In N. Graulich, J. Arnold, S. Sorge, & M. Kubsch (Hrsg.), *Lehrkräftebildung von morgen: Der Beitrag der Naturwissenschafts-didaktiken zur Förderung überfachlicher Kompetenzen* (S. 147–157). Waxmann.
- Grothaus, J., Tischer, J., & Terhardt, A. (2025). (Im Druck). Außerschulische Bildung zur Klimakrise. In S. Heinicke, D. Höttecke, H. Martens, A. Nehring, & T. Rabe (Hrsg.), *Handbuch Klimabildung*. Springer Fachmedien.
- Hümbert-Schnurr, S., Grothaus, J., & Wackermann, R. (2025). (Im Druck). Vom Wissen zum Handeln. In S. Heinicke, D. Höttecke, H. Martens, A. Nehring, & T. Rabe (Hrsg.), *Handbuch Klimabildung*. Springer Fachmedien.
- IPCC Core Writing Team. (2023). Summary for policymakers. In H. Lee & J. Romero (Hrsg.), *Climate change 2023: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (S. 1–34). Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>
- Kuckartz, U., Dresing, T., Radiker, S., & Stefer, C. (2008). *Qualitative Evaluation: Der Einstieg in die Praxis* (2. Aufl.). VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- Lehrer, L., Geiger, M., Sprengholz, P., Jenny, M., Temme, H. L., Shamsrizi, P., Eitze, S., & Betsch, C. (2024). *Study protocol of the Planetary Health Action Survey (PACE): A serial cross-sectional survey to assess the readiness to act against climate change*. *BMJ Open*, 14(11), e091093. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2024-091093>
- Neumaier, P. (2022). *Entwicklung eines Leitfadens für die qualitative Evaluation des Schülerlabors Labs4Future*. (Unveröffentlichte Masterarbeit). Universität Würzburg.
- Stoltenberg, U., & Burandt, S. (2014). Bildung für eine nachhaltige Entwicklung. In H. Heinrichs & G. Michelsen (Hrsg.), *Nachhaltigkeitswissenschaften* (S. 567–594). Springer.
- Umweltbundesamt. (2023). *Umweltbewusstsein in Deutschland 2022: Ergebnisse einer repräsentativen Bevölkerungsumfrage*. https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/umweltbewusstsein_2022_bf.pdf

Interviewstudie zu Modellen einfacher Stromkreise

- Ein qualitativer Vergleich von Elektronengas- und Wasserfallmodell -

Katharina Leibfarth*, Ulrich Trautwein*, Peter Gerjets[†], Jan-Philipp Burde*

*Universität Tübingen [†]Leibniz-Institut für Wissensmedien Tübingen
katharina.leibfarth@uni-tuebingen.de

Kurzfassung

In der Physik sind viele Größen und Konzepte abstrakt, unanschaulich oder nicht direkt beobachtbar, wie beispielsweise die elektrische Spannung in einem Stromkreis. Daher liegt es nahe, bei der unterrichtlichen Behandlung von elektrischen Stromkreisen auf entsprechende Analogien bzw. Modelle zurückzugreifen, um diese zu veranschaulichen. Die fachdidaktische Forschung hat sich bisher primär auf die Entwicklung und Evaluation einzelner Modelle des einfachen Stromkreises fokussiert; vergleichende Analysen zur Akzeptanz bzw. Lernförderlichkeit der Modelle fehlen jedoch weitgehend. Um diesem Desiderat zu begegnen wurden Akzeptanzbefragungen mit Lernenden zum Elektronengasmodell und zum Wasserfallmodell durchgeführt, die beide grundsätzlich zur Veranschaulichung der elektrischen Spannung geeignet sind. Die Ergebnisse zeigen, dass grundsätzlich beide Modelle von den Lernenden akzeptiert werden. Unterschiede zwischen den Modellen zeigen sich in Bezug auf das Konzeptverständnis der Modelle und der zugrundeliegenden Stromkreise, sowie dem Analogieschluss zwischen Modell und Stromkreis.

1. Hintergrund

Vom Stromverbrauch bis zur Spannung als Eigenschaft des Stroms: Lernendenvorstellungen zu einfachen Stromkreisen sind auch nach dem Unterricht noch weit verbreitet (Burde, 2018; Engelhardt & Beichner, 2004; Ivanjek et al., 2021; Shipstone et al., 1988). Damit sind einfache Stromkreise ein schwieriges und abstraktes Thema des Physikunterrichts. Ein möglicher Grund der konzeptuellen Schwierigkeiten liegt in der geringen Anschaulichkeit: Zentrale Größen wie die elektrische Spannung, Stromstärke oder Widerstand, aber auch deren Beziehungen entziehen sich unserer direkten Wahrnehmung (Burde & Wilhelm, 2017). Infolgedessen liegt es nahe physikalische Größen und Zusammenhänge mit Hilfe von Modellen und Analogien zu veranschaulichen. Dabei schlägt die Analogie eine Brücke (Oh & Oh, 2011) vom Bekannten zum Unbekannten, d. h. hier vom Modell zum Stromkreis.

1.1. Modelle und Analogien

Allgemein betrachtet ist eine Analogie eine Abbildung, die, wie in Abbildung 1 illustriert, einen vertrauten Ausgangs- oder Modellbereich mit einem unbekanntem Zielbereich verknüpft (Gentner, 1983). Ein Modell kann in diesem Sinne als der bekannte Modellbereich verstanden werden, der über eine Analogie das Verständnis des Zielbereichs, beispielsweise des Stromkreises, erleichtern soll. Die Analogie verbindet dabei sowohl Größen und Eigenschaften beider Bereiche als auch die Relationen zwischen den Größen miteinander (Gentner, 1983).

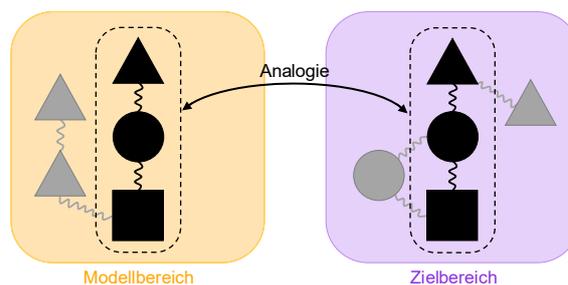


Abb. 1: Analogie zwischen Objekten und Beziehungen des Modell- und Zielbereichs (angelehnt an Duit & Glynn, 1995, S. 4)

Gleichzeitig haben Analogien als partielle Isomorphismen Grenzen. Dies sind beispielsweise Größen und Beziehungen, die keine strukturelle Entsprechung im anderen Bereich vorweisen und in Abbildung 1 grau veranschaulicht werden (Gentner, 1983). Als Beispiel nennen Burde und Gottschlich (2022), dass das Wasserfallmodell, entsprechend der Alltagserfahrung mit Flussquellen, die Lernendenvorstellung der Batterie als Konstantstromquelle fördert. Neben dem Wasserfallmodell gibt es noch viele andere Modelle des elektrischen Stromkreises, die von Lehrkräften in der schulischen Praxis genutzt werden. Einerseits setzt die überwiegende Mehrheit der Lehrpersonen Stromkreismodelle ein. Andererseits wählen sie dabei individuell unterschiedliche Modelle, sodass eine große Heterogenität im Modelleinsatz besteht (Frank & Trefzger, 2024; Leibfarth et al., 2024; Schubatzky, 2020).

1.2. Modellauswahl

Eine Möglichkeit zur Systematisierung der verschiedenen Modelle des elektrischen Stromkreises besteht darin, sie nach ihrer zum elektrischen Potential bzw. zur elektrischen Spannung analogen Größe zu kategorisieren (Burde & Wilhelm, 2017). Beispielsweise entspricht bei Höhenanalogien der Höhenunterschied der elektrischen Spannung, während es bei Druckanalogien z. B. der Luft- oder Wasserdruckunterschied ist. In Studien zeigt sich, dass es genau diese Modelle sind, die im Elektrizitätslehreunterricht am häufigsten verwendet werden (Frank & Trefzger, 2024; Leibfarth et al., 2024). Neben dem Wasserfallmodell, auch als offener Wasserkreislaufmodell mit Höhendifferenz bezeichnet, sind Beispiele für andere Modelle, denen eine Höhenanalogie zugrunde liegt, z. B. das Skifahrer:innen-, Bikepark- oder Stäbchenmodell (Bodensiek et al., 2019; Burde & Gottschlich, 2022; Gleixner, 1998; Müller & Mandler, 2022; Wodzinski, 2013). Beispiele für Modelle, denen die Druckanalogie zugrunde liegt, sind das Elektronengasmodell (Burde, 2018) und der ebene geschlossene Wasserkreislauf (Schwedes & Dudeck, 1993). Bei Ersterem entspricht die Spannung einem „elektrischen Druckunterschied“, bei Letzterem einem Wasserdruckunterschied. Während das Elektronengasmodell einen positiven Einfluss auf das Konzeptverständnis einfacher Stromkreise hat (Burde, 2018), haben Lernende mit dem ebenen Wasserkreislauf ähnliche Verständnisschwierigkeiten wie mit dem Stromkreis (Schwedes & Schilling, 1983). Im Folgenden wird daher nicht das Modell des ebenen geschlossenen Wasserkreislaufs näher betrachtet und mit dem Elektronengasmodell verglichen, sondern das Wasserfallmodell (vgl. Abbildung 2).

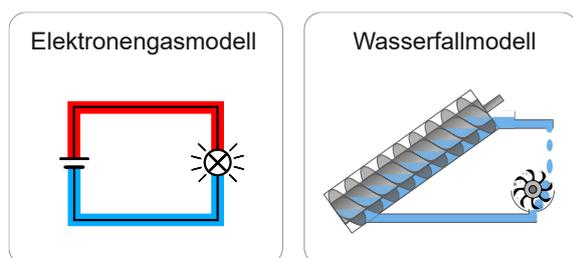


Abb. 2: Elektronengasmodell und Wasserfallmodell (eigene Darstellung)

1.2.1. Elektronengasmodell

Das Elektronengasmodell (Burde, 2018) führt den „elektrischen Druck“ als Analogon zum elektrischen Potential und die Spannung dementsprechend als „elektrischen Druckunterschied“ ein. Der elektrische Strom sowie Bauteile wie Batterien und Lämpchen sind sowohl im Modell als auch realen Stromkreis gleich benannt. Das Modell verdeutlicht, dass sich die Spannung als Potentialdifferenz auf zwei Punkte im Stromkreis bezieht und (ideale) Batterien konstante Potentialdifferenzen liefern (Burde et al., 2021). Außerdem entwickeln Lernende, die anhand des

Elektronengasmodells unterrichtet wurden, ein besseres Verständnis der elektrischen Spannung (Burde, 2018). Obwohl nicht davon auszugehen ist, dass das Modell klar darstellt, dass Strom nicht verbraucht wird (Burde et al., 2021), tritt die Stromverbrauchsvorstellung im Vergleich zum klassischen Unterricht seltener auf (Burde, 2018).

1.2.2. Wasserfallmodell

Im Wasserfallmodell entspricht das elektrische Potential der Höhe bzw. der potentiellen Energie. Schüler:innen der Sekundarstufe I verfügen in der Regel über Vorerfahrungen hinsichtlich des Zusammenhangs von potentieller Energie und Höhe, an die anhand der Darstellung der Spannung als Höhendifferenz angeknüpft werden kann (Bodensiek et al., 2019).

Der Wasserstrom im Wasserfallmodell entspricht dem elektrischen Strom. Wie z. B. aus Wassermühlen bekannt, fließt im Wasserfallmodell das Wasser von großer Höhe über ein Wasserrad, das im Stromkreis dem elektrischen Widerstand entspricht, nach unten. Dabei gilt: So wie der Höhenunterschied die Ursache des Wasserstroms ist, ist die Spannung die Ursache des elektrischen Stroms (Burde & Gottschlich, 2022). Eine archimedische Schraube als Analogon zur Batterie transportiert das Wasser wieder auf die ursprüngliche Höhe, sodass ein Kreislauf entsteht. Eine Stärke der Höhenanalogie wird darin gesehen, dass sie das Verständnis von Potential, Spannung und deren Differenzcharakter erleichtert (Bodensiek et al., 2019; Gleixner, 1998; Hindriksen et al., 2023).

In der fachdidaktischen Forschung wurden Stromkreismodelle bisher primär im Rahmen der Entwicklung von Unterrichtskonzeptionen evaluiert (Burde, 2018; Gleixner, 1998; Koller et al., 2008) oder deren Stärken, Schwächen und Grenzen theoretisch diskutiert (Burde & Gottschlich, 2022; Burde & Wilhelm, 2017; Härtel, 2012; Kahnt, 2022; Müller & Mandler, 2022). Vergleichende Untersuchungen, z. B. mit Blick auf die Akzeptanz und das Verständnis des Elektronengasmodells und des Wasserfallmodells bei Lernenden, wurden bisher jedoch kaum durchgeführt (vgl. Hindriksen et al., 2023).

Um diesem Desiderat zu begegnen, sollen das Elektronengas- und das Wasserfallmodell anhand folgender Fragestellungen verglichen werden:

2. Forschungsfragen

- I. Wie werden das Elektronengasmodell und das Wasserfallmodell von den Lernenden akzeptiert, paraphrasiert und konzeptuell verstanden?
- II. Wie unterscheidet sich das Konzeptverständnis der Lernenden bezüglich des einfachen Stromkreises nach Instruktion auf Basis des Elektronengasmodells bzw. des Wasserfallmodells?

3. Methode

Um die Forschungsfragen zu beantworten, wurden Akzeptanzbefragungen (Jung, 1992; Wodzinski & Wiesner, 1996) mit Schüler:innen der siebten und achten Jahrgangsstufe durchgeführt. Die Interviews wurden aufgezeichnet, die Tonaufnahmen im Anschluss transkribiert und mittels einer qualitativen Inhaltsanalyse ausgewertet (Kuckartz & Rädiker, 2022).

Zum Zeitpunkt der Interviews hatten die Teilnehmenden im Physikunterricht einfache Stromkreise noch nicht behandelt.

3.1. Stichprobe

Insgesamt wurden 14 Schüler:innen der Jahrgangsstufen 7 und 8 aus Baden-Württemberg befragt. Die Hälfte, wurde dabei auf Basis des Elektronengasmodells, die andere Hälfte auf Basis des Wasserfallmodells instruiert. Die Teilnehmenden beider Gruppen waren zum Zeitpunkt der Befragungen 12 bis 13 Jahre alt ($M = 12.6$, $SD = 0.5$). Um sowohl die Heterogenität innerhalb einer Klasse abzubilden und gleichzeitig vergleichbare Gruppen zu betrachten, wurde in beiden Gruppen auf eine vergleichbare Verteilung der Lernenden mit Blick auf Gender und Leistungsstand geachtet. Die Stichprobe ist in Tabelle 1 beschrieben. Insgesamt identifizierten sich je Gruppe vier Personen als weiblich, drei Personen als männlich und keine Schüler:in als divers. Davon wurde jeweils eine männliche sowie eine weibliche Person als „leistungsstark“, „durchschnittlich“ und „leistungsschwach“ eingeschätzt. Die siebte weibliche Person wurde ebenfalls dem leistungsstarken Drittel zugeordnet.

Tab. 1: Stichprobenbeschreibung¹

	EGM		WFM	
	m	w	m	w
leistungsstark	1	2	1	2
durchschnittlich	1	1	1	1
leistungsschwach	1	1	1	1

3.2. Akzeptanzbefragung

Die Interviews basieren auf der Methode der Akzeptanzbefragung (Jung, 1992; Wodzinski & Wiesner,

1996), die sich aus der Kombination einer physikalischen Erklärung und semistrukturierten leitfadengestützten Einzelinterviews zusammensetzt.

Das Ziel liegt darin herauszufinden, inwieweit eine physikalische Erklärung von Lernenden akzeptiert wird und inwiefern Lernende ein physikalisches Konzept verstehen und anwenden können. Dafür wird zu Beginn eine fachliche Erklärung eines Konzepts des einfachen Stromkreises von der interviewenden Person gegeben, wobei der instruktive Charakter darauf abzielt, der Entstehung von Ad-hoc-Annahmen bei den Lernenden entgegenzuwirken (Wodzinski & Wiesner, 1996). Auf die Erklärung folgen drei Interviewschritte: Zuerst werden die Lernenden nach ihrer Akzeptanz gefragt (z. B. „Wie findest du diese Erklärung? Ist irgendetwas daran komisch oder unverständlich?“). Als Zweites werden die Teilnehmenden nach einer Paraphrase der Erklärung gefragt (z. B. „Kannst du die Erklärung mit deinen eigenen Worten wiederholen?“) und sie sollen im dritten Schritt Anwendungsaufgaben durch das Anwenden des Konzepts lösen (Jung, 1992). Dieser Vierschritt aus Erklärung, Akzeptanz, Paraphrase und Anwendungsaufgabe wird zyklisch mit unterschiedlichen Konzepten durchgeführt. Die Methode der Akzeptanzbefragung ermöglicht es die Akzeptanz und das Verständnis physikalischer Konzepte durch die Lernenden inklusive spezifischer Verständnisschwierigkeiten zu identifizieren, zu analysieren sowie Schwierigkeiten einzelner Aspekte der Erklärungen (z. B. anhand der Modelle) detailliert zu evaluieren (Wodzinski & Wiesner, 1996). Jung (1992) betont, dass sich die Methode insbesondere dazu eignet, Verständnisschwierigkeiten bzw. Lernendenvorstellungen zu identifizieren und der Frage nachzugehen, wie mit diesen umgegangen werden kann.

3.3. Interviewstruktur

Die Erklärungen innerhalb der Akzeptanzbefragung zielen auf zentrale Konzepte des elektrischen Stromkreises, beispielsweise die Spannung als Potentialdifferenz, ab. Dabei wurde mit Blick auf die Sachstruktur ein Potentialansatz verfolgt (Cohen et al., 1983; Herrmann & Schmälzle, 1984; Psillos et al., 1988): Ausgehend vom elektrischen Potential wird der Differenzcharakter der elektrischen Spannung als

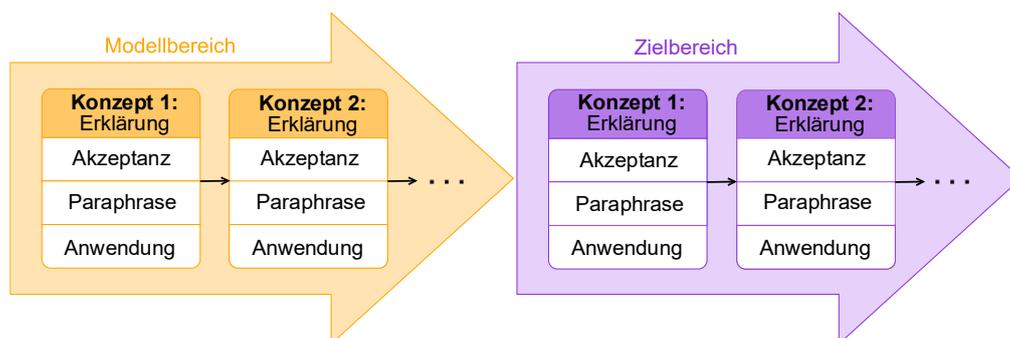
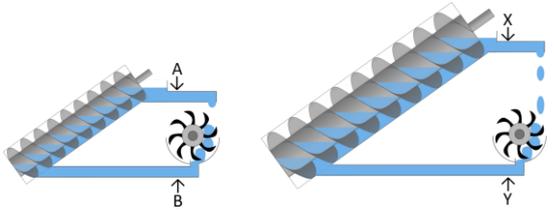


Abb. 3: Verlaufsplan der Interviews (eigene Darstellung)

¹EGM = Elektronengasmodell, WFM = Wasserfallmodell, m = männlich, w = weiblich

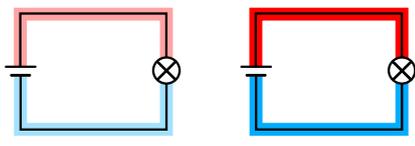
Die abgebildeten Wasserkreisläufe enthalten jeweils das gleiche Wasserrad, aber unterschiedliche Schrauben. In der linken Abbildung ist eine kleine Schraube, in der rechten Abbildung eine große Schraube verbaut.



Der **Höhenunterschied** zwischen den Punkten A und B (linke Abbildung) ist kleiner als der **Höhenunterschied** zwischen den Punkten X und Y (rechte Abbildung). Welche Aussage zum **Wasserstrom** ist richtig?

A) Der **Wasserstrom** am Punkt A ist **größer** als der **Wasserstrom** am Punkt X.
 B) Der **Wasserstrom** am Punkt A ist **kleiner** als der **Wasserstrom** am Punkt X.
 C) Der **Wasserstrom** am Punkt A ist **gleich groß** wie der **Wasserstrom** am Punkt X.

Die abgebildeten Stromkreise enthalten jeweils das gleiche Lämpchen aber unterschiedliche Batterien. In der linken Abbildung ist eine schwache Batterie, in der rechten Abbildung eine starke Batterie verbaut.



Der **elektrische Druckunterschied** zwischen den Punkten A und B (linke Abbildung) ist kleiner als der **elektrische Druckunterschied** zwischen den Punkten X und Y (rechte Abbildung). Welche Aussage zum **elektrischen Strom** ist richtig?

A) Der **elektrische Strom** am Punkt A ist **größer** als der **elektrische Strom** am Punkt X.
 B) Der **elektrische Strom** am Punkt A ist **kleiner** als der **elektrische Strom** am Punkt X.
 C) Der **elektrische Strom** am Punkt A ist **gleich groß** wie der **elektrische Strom** am Punkt X.

Abb. 4: Anwendungsaufgabe im Wasserfallmodell und im Elektronengasmodell (eigene Darstellung)

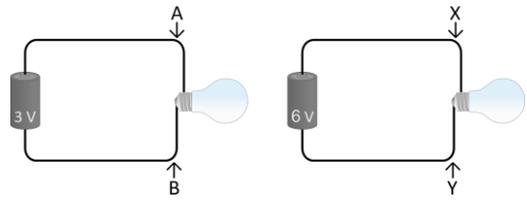
Potentialdifferenz eingeführt. Nach anschließender Einführung des elektrischen Stroms wird die Relation beider Grundgrößen Spannung und Stromstärke in unterschiedlichen Situationen, beispielsweise einem offenen Stromkreis oder einer Parallelschaltung, behandelt.

Inhaltlich gliedern sich die Akzeptanzbefragungen in zwei parallele Teile: Im ersten Teil wird der Modellbereich behandelt und im zweiten Teil der Stromkreis als Zielbereich. Abbildung 3 veranschaulicht die Zweiteilung in Modellbereich (gelb) und Zielbereich (lila). Die Zweiteilung dient dazu, das Verständnis zentraler Konzepte innerhalb eines Modells sowie das Verständnis entsprechender Konzepte im einfachen Stromkreis zu unterscheiden, getrennt zu analysieren und vergleichend zu betrachten.

Im ersten Teil werden grundlegende Konzepte innerhalb eines Modells – entweder dem Elektronengas- oder dem Wasserfallmodell – erörtert. Beispielsweise ist der Höhenunterschied im Wasserfallmodell für den Wasserstrom verantwortlich, während der elektrische Druckunterschied im Elektronengasmodell eine Voraussetzung für den elektrischen Strom ist. Im zweiten Teil werden die analogen Konzepte im einfachen Stromkreis unter Rückbezug zum Modell thematisiert. Beispielsweise ist im Stromkreis die elektrische Spannung als Potentialdifferenz mit der Höhendifferenz im Wasserfallmodell sowie der elektrische Druckunterschied des Elektronengasmodells vergleichbar. So ähnlich wie der Höhenunterschied für den Wasserstrom und der elektrische Druckunterschied für den elektrischen Strom verantwortlich sind, bildet die elektrische Spannung eine Voraussetzung für den elektrischen Strom. Der Aufbau sowie der physikalische Inhalt beider in Abbildung 3

dargestellten Interviewteile ist analog gehalten. Wird beispielsweise in einer Erklärung im Modellbereich die Relation des Höhenunterschieds mit dem Wasserstrom bzw. des elektrischen Druckunterschieds mit der elektrischen Stromstärke behandelt, wurde an gleicher Stelle im Zielbereich der Zusammenhang von Potentialdifferenz und Stromstärke thematisiert. Exemplarisch ist eine Anwendungsaufgabe zum Zusammenhang von Spannung und Stromstärke in Abbildung 5 bzw. deren Analogon in beiden Modellbereichen in Abbildung 4 dargestellt. Zu Beginn der Anwendungsaufgabe wird den Schüler:innen eine

Die abgebildeten Stromkreise enthalten jeweils das gleiche Lämpchen aber unterschiedliche Batterien. In der linken Abbildung ist eine schwache Batterie, in der rechten Abbildung eine starke Batterie verbaut.



Der **Potentialunterschied** zwischen den Punkten A und B (linke Abbildung) ist kleiner als der **Potentialunterschied** zwischen den Punkten X und Y (rechte Abbildung). Welche Aussage zum **elektrischen Strom** ist richtig?

A) Der **elektrische Strom** am Punkt A ist **gleich groß** wie der **elektrische Strom** am Punkt X.
 B) Der **elektrische Strom** am Punkt A ist **größer** als der **elektrische Strom** am Punkt X.
 C) Der **elektrische Strom** am Punkt A ist **kleiner** als der **elektrische Strom** am Punkt X.

Abb. 5: Anwendungsaufgabe im Stromkreis (eigene Darstellung)

Abbildung des Sachverhalts im Modell bzw. im elektrischen Stromkreis vorgelegt, die Aufgabe beschrieben und dann mögliche physikalische Antworten durch die interviewende Person präsentiert, aus denen die Lernenden wählen und dies begründen sollen. Die Darstellung der Lämpchen ist unabhängig von der Stromstärke gewählt.

3.4. Auswertung

Durchschnittlich dauerten die Interviews 47 Minuten, was etwa einer Schulstunde entspricht, wobei das kürzeste Interview 35 Minuten, das längste 62 Minuten in Anspruch nahm.

Die Codierung basiert auf deduktiv festgelegten Kategorien. Dabei werden zur Evaluation der Akzeptanz die ordinalskalierten Kategorien „uneingeschränkt akzeptiert“, „akzeptiert mit Einschränkungen“ und „nicht akzeptiert“ angewandt. Analog werden die Paraphrase und die Anwendungsaufgaben mit „korrekt paraphrasiert/ gelöst“, „teilweise korrekt paraphrasiert/ gelöst“ oder „nicht korrekt paraphrasiert/ gelöst“ codiert.

Die Doppeltcodierung von 20 % der Interviews durch eine unabhängige Person ergab eine Inter-coderübereinstimmung von $\kappa = .81$ (Brennan & Prediger, 1981), was einer sehr guten Übereinstimmung entspricht (Kuckartz & Rädiker, 2022).

4. Ergebnisse

Entsprechend Forschungsfrage I werden im Folgenden zunächst die Ergebnisse des ersten Teils der Akzeptanzbefragung, welcher sich auf die Akzeptanz und das Verständnis des Modells bezieht, berichtet. Anschließend werden die Ergebnisse zu Forschungsfrage II zum Konzeptverständnis des Stromkreises vorgestellt.

4.1. FF I: Akzeptanz, Paraphrase und Anwendungsaufgaben im Modell

Die Ergebnisse der Akzeptanz- und Paraphrastufen beider Modelle sind in Abbildung 6 farbcodiert dargestellt. Angelehnt an ein „Ampelsystem“ (Morris & Hopf, 2022, S. 2) entspricht Grün einer uneingeschränkten Akzeptanz der Erklärung seitens der:des Lernenden, Gelb stellt eine Akzeptanz mit Einschränkungen dar und Rot signalisiert, dass die Erklärung nicht angenommen wurde. Hinsichtlich der Paraphrase beschreibt Grün, dass die Erklärung korrekt, Gelb, dass teilweise korrekt und Rot, dass nicht korrekt paraphrasiert wurde. Die Benennung der einzelnen Konzepte im Modell orientiert sich dabei an der analogen Größe im Stromkreis, beispielsweise beschreibt der „Potentialunterschied“ je nach Modell den elektrischen Druckunterschied bzw. den Höhenunterschied.

Wie Abbildung 6 zu entnehmen ist, stoßen die Erklärungen der einzelnen Konzepte sowohl im Elektronengasmodell als auch im Wasserfallmodell bei den meisten Lernenden auf Akzeptanz. Unterschiede zeigen sich hingegen bei der Paraphrase. Insbesondere scheinen Lernende im Elektronengasmodell etwas mehr Schwierigkeiten mit der Paraphrase der Inhalte des Abschnitts „Einführung“ zu haben, in welchem Bauteile wie Lämpchen und Batterien und deren Darstellung eingeführt wurden, als Lernende, die hier eine Erklärung auf Basis des Wasserfallmodells erhalten haben. Dies ist möglicherweise darauf zurückzuführen, dass Lernende mit den entsprechenden Begriffen und Darstellungen des Wasserfallmodells (z. B. „Wasserrad“ oder „Schraube“) vertrauter sind als mit den im Elektronengasmodell genutzten technisch-physikalischen Begriffen und Schaltzeichen (z. B. „Lämpchen“ oder „Batterie“).

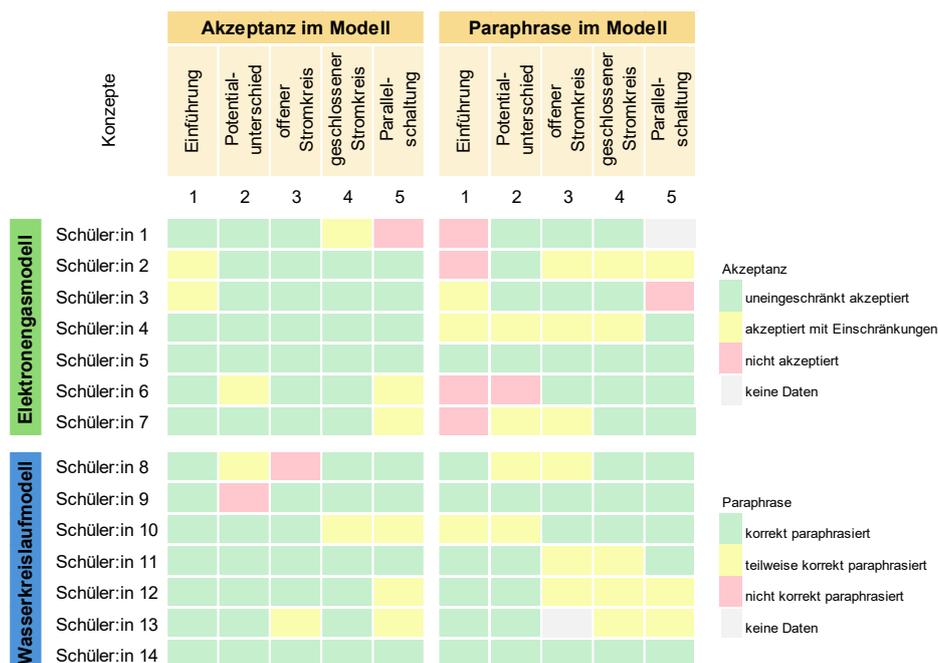


Abb. 6: Farbcodierte Ergebnisse der Akzeptanz sowie der Paraphrase der Erklärungen im Elektronengas- und Wasserfallmodell (eigene Darstellung)

Die Ergebnisse der Anwendungsaufgaben sind in Abbildung 7 gezeigt. Entsprechend der zeitlichen Abfolge in den Akzeptanzbefragungen zeigt die linke Seite je zwei Anwendungsaufgaben je Konzept im Modell, die rechte Seite die entsprechenden Aufgaben und Konzepte im Stromkreis. Pro Zeile sind die Antworten einer:s Lernenden dargestellt, wobei Schüler:in 1-7 dem Elektronengasmodell und Schüler:in 8-14 dem Wasserfallmodell zuzuordnen sind. Die Antworten der Schüler:innen bei den Anwendungsaufgaben zu den Modellen sind vor allem mit Blick auf die zur Spannung analogen Größen, d. h. dem elektrischen Druckunterschied sowie dem Höhenunterschied vielversprechend: In beiden Modellen ist ein Großteil der Lernenden in der Lage, die Druck- bzw. Höhenunterschiede innerhalb eines einfachen Kreislaufs (vgl. Anwendungsaufgabe 2b (links) in Abbildung 7), wie er beispielsweise in Abbildung 2 dargestellt ist, aber auch in Parallelschaltungen (vgl. Anwendungsaufgabe 5a (links) in Abbildung 7) auf einfache Fragestellungen anzuwenden.

Hingegen zeigt sich ein wesentlicher Unterschied im Verständnis der Modelle hinsichtlich der Stromstärke in einem geschlossenen Stromkreis (vgl. Anwendungsaufgabe 4b (links) in Abbildung 7): Die Mehrheit der Lernenden, die anhand des Elektronengasmodells angeleitet wurde, hat Schwierigkeiten die Stromstärke „vor“ und „hinter“ einem Lämpchen korrekt als gleich groß zu erkennen. Viele Lernende sagen stattdessen, dass die Stromstärke vor der Lampe größer sei als dahinter, was womöglich jedoch auf eine begriffliche bzw. konzeptionelle Vermischung des Potenzial- und Stromstärkebegriffs und nicht zwangsläufig auf eine Stromverbrauchsvorstellung hindeutet.

Im Gegensatz dazu erkennen im Wasserfallmodell beinahe alle Lernenden, dass die Wasserstromstärke durch das Wasserrad nicht verändert wird (vgl. Anwendungsaufgabe 4b (links) in Abbildung 7), denn „das ist ja immer ein Kreislauf und das Wasser, wo mal hier [unten] ist, ist auch mal hier oben“ (Schüler:in 11, Pos. 37). Diese Argumentation des Kreislaufs wird von weiteren Lernenden angeführt, beispielsweise argumentiert Schüler:in 13: „Es ist ja immer der gleiche Kreislauf und die Menge ist gleich. Das wird ja nicht einmal mehr und einmal weniger oben und unten“ (Pos. 55).

In Parallelschaltungen scheint die Stromstärke für die Lernenden insgesamt im Vergleich zur Spannung die schwierigere Größe darzustellen (vgl. Anwendungsaufgabe 5b (links) in Abbildung 7). Im Elektronengasmodell sind die Lernenden eher in der Lage die Stromstärken korrekt anzugeben, allerdings fallen die Begründungen häufig unvollständig oder physikalisch inkorrekt aus. Beim Wasserfallmodell argumentieren mehrere Lernende anhand der Aufteilung des konstanten Wasserstroms auf parallel geschaltete Wasserräder – analog zur Lernendenvorstellung der „konstanten Stromquelle“ im elektrischen Stromkreis.

4.2. FF II: Anwendungsaufgaben im Stromkreis

Betrachtet man die Antworten auf die Anwendungsaufgaben im Stromkreis (Abbildung 7 rechts), zeigen sich teilweise Parallelen zu den Ergebnissen in den Modellen (Abbildung 7 links). Einerseits sind beispielsweise die Schwierigkeiten mit dem Strom in einem geschlossenen Stromkreis, die bereits im Elektronengasmodell beobachtet wurden, bei dieser Gruppe auch im Stromkreis zu sehen. Ähnlich treten

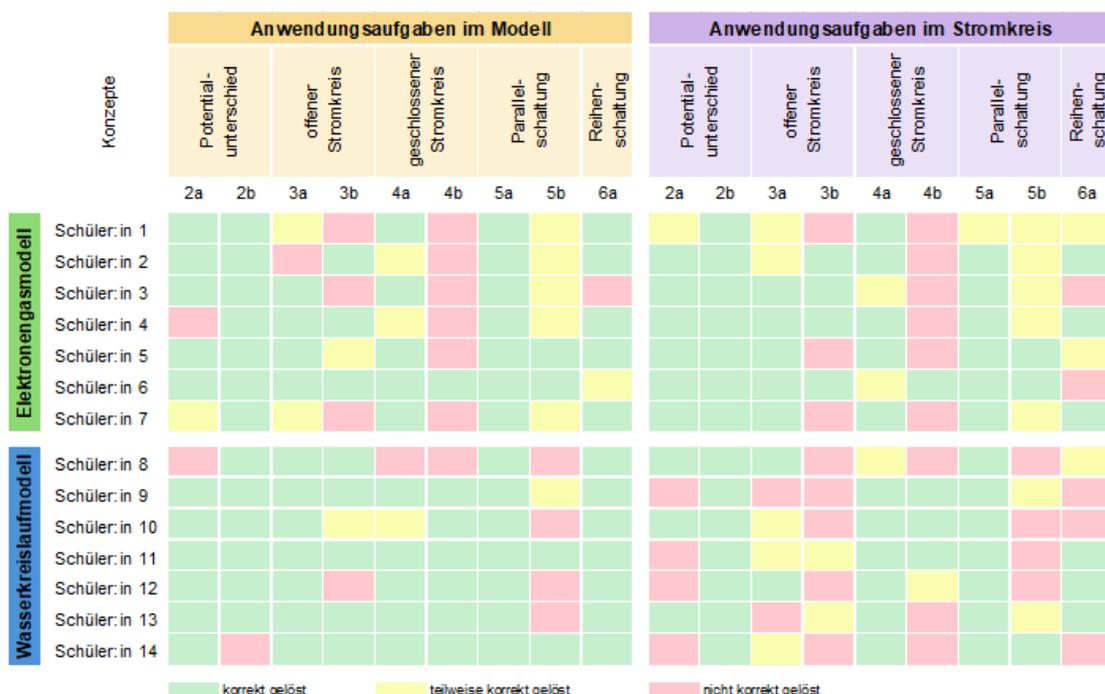


Abb. 7: Farbcodierte Ergebnisse der Anwendungsaufgaben im Elektronengas- und Wasserfallmodell sowie im einfachen Stromkreis (eigene Darstellung)

die Schwierigkeiten mit Parallelschaltungen vor allem bei der Wasserfallgruppe erneut auf.

Andererseits zeigen sich mit Blick auf den Analogieschluss zwischen dem Elektronengas- und dem Wasserfallmodell Unterschiede: Während bei den Anwendungsaufgaben im Modellbereich beim Wasserfallmodell weniger Schwierigkeiten aufgetreten sind als im Elektronengasmodell, haben Lernende, die auf Basis des Elektronengasmodells instruiert wurden, im Zielbereich weniger Schwierigkeiten als ihre Peers, die zuvor auf Basis des Wasserfallmodells unterrichtet wurden.

5. Diskussion

Basierend auf der Literatur sind beide Modelle grundsätzlich geeignet die elektrische Spannung, die Lernenden häufig Schwierigkeiten bereitet (Ivanjek et al., 2021), und ihren Differenzcharakter zu veranschaulichen (Burde, 2018; Burde & Gottschlich, 2022). Die Ergebnisse der Akzeptanzbefragung bestätigen diese Einschätzungen.

Die ähnlichen Ergebnisse des Modell- und Zielbereichs im Elektronengasmodell mit Blick auf die Anwendungsaufgaben deuten darauf hin, dass den Lernenden der Analogieschluss hier leichter fällt. Zurückzuführen ist dies möglicherweise darauf, dass der Übergang vom Wasserfallmodell hin zum Stromkreis eine größere Transferleistung seitens der Lernenden erfordert als bei einer Instruktion auf Basis des Elektronengasmodells, das eine größere Ähnlichkeit zu den Oberflächenstrukturen zum Stromkreis hat. Hingegen kann das bessere Verständnis des Modellbereichs im Wasserfallmodell möglicherweise auf die größere Vertrautheit der Lernenden hiermit zurückgeführt werden.

Ferner werfen die Akzeptanzbefragungen die Frage nach Lernendenvorstellungen auf. Beispielsweise beschreibt die Literatur die begriffliche und konzeptuelle Vermischung des Strom- und Spannungskonzepts als häufig vertretene Lernendenvorstellung zu einfachen Stromkreisen (Burde, 2018; Engelhardt & Beichner, 2004; von Rhöneck, 1986). Auf ähnliche Schwierigkeiten deuten unsere Ergebnisse hin, wobei der entscheidende Unterschied darin liegt, dass die Lernenden nach einer Instruktion mittels des Elektronengasmodells das Potential bzw. den elektrischen Druck (statt die elektrische Spannung) teils mit dem Strombegriff vermischen. Außerdem wird die Batterie von vielen Lernenden als eine konstante Stromquelle aufgefasst (Engelhardt & Beichner, 2004; Shipstone et al., 1988; Urban-Woldron & Hopf, 2012), was ähnlich im Wasserfallmodell bereits von Burde und Gottschlich (2022) als Schwäche des Modells beschrieben wurde.

Da die Lernenden erstmalig im Rahmen der Akzeptanzbefragungen mit dem Thema „einfacher Stromkreis“ in Kontakt kamen, konnten lediglich grundlegende Konzepte und Zusammenhänge in sehr einfachen Stromkreisen untersucht werden, was die

Aussagekraft der Befunde insbesondere mit Blick auf weiterführende Themen des Unterrichts einschränkt. Aufgrund der geringen Stichprobe von 14 Lernenden sind die Ergebnisse zudem nicht verallgemeinerbar.

6. Ausblick

Während die hier vorgestellten Ergebnisse der Akzeptanzbefragung bereits wertvolle Einblicke bieten, steht eine tiefere Analyse der Antworten der Lernenden und eine Evaluation hinsichtlich gezeigter Lernendenvorstellungen noch aus. Außerdem werden weitere Akzeptanzbefragungen mit dem Fahrradkettenmodell, dessen Fokus auf der Stromstärke liegt, einer Kombination zweier Modelle sowie einer modellfreien Vermittlung geführt. Die hier gewonnenen qualitativen Erkenntnisse bilden die Grundlage für eine anschließende empirisch-quantitative Studie zum Vergleich unterschiedlicher Stromkreismodelle.

7. Literatur

- Bodensiek, O., Sonntag, D. A., Glawe, I., & Müller, R. (2019). 3D-printable height models for dc circuits. *Journal of Physics: Conference Series*, 1286(1), 012010. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1286/1/012010>
- Brennan, R. L., & Prediger, D. J. (1981). Coefficient Kappa: Some Uses, Misuses, and Alternatives. *Educational and Psychological Measurement*, 41(3), 687–699. <https://doi.org/10.1177/001316448104100307>
- Burde, J.-P. (2018). *Konzeption und Evaluation eines Unterrichtskonzepts zu einfachen Stromkreisen auf Basis des Elektronengasmodells*. Logos Verlag Berlin. <https://doi.org/10.30819/4726>
- Burde, J.-P., & Gottschlich, B. (2022). Höhenmodelle mit Stromanalogon - Lernhilfe oder Lernhindernis? *MNU-Journal*, 75(4), 332–338.
- Burde, J.-P., Weatherby, T. S., & Kronenberger, A. (2021). An analogical simulation for teaching electric circuits: A rationale for use in lower secondary school. *Physics Education*, 56, 055010. <https://doi.org/10.1088/1361-6552/ac03fe>
- Burde, J.-P., & Wilhelm, T. (2017). Modelle in der Elektrizitätslehre. Ein didaktischer Vergleich verbreiteter Stromkreismodelle. *Naturwissenschaften im Unterricht Physik*, 28(157), 8–13.
- Cohen, R., Eylon, B., & Ganiel, U. (1983). Potential difference and current in simple electric circuits: A study of students' concepts. *American Journal of Physics*, 51(5), 407–412. <https://doi.org/10.1119/1.13226>
- Duit, R., & Glynn, S. (1995). Analogien - Brücken zum Verständnis. *Naturwissenschaften im Unterricht Physik*, 6(27), 4–10.
- Engelhardt, P. V., & Beichner, R. J. (2004). Students' understanding of direct current resistive electrical circuits. *American Journal of Physics*, 72(1), 98–115.

- Frank, F., & Trefzger, T. (2024). Zum Einfluss der Nutzung von Modellanalogien auf das Konzeptwissen: Bericht zum Leistungsstand gymnasialer Mittelstufenschüler*innen in der Elektrizitätslehre. *PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*. <https://ojs.dpg-physik.de/index.php/phydid-b/article/view/1469>
- Gentner, D. (1983). Structure-Mapping: A Theoretical Framework for Analogy*. *Cognitive Science*, 7(2), 155–170. https://doi.org/10.1207/s15516709cog0702_3
- Gleixner, C. (1998). *Einleuchtende Elektrizitätslehre mit Potential: Untersuchungen zu Lernprozessen in der elementaren Elektrizitätslehre*. Ludwig-Maximilians-Universität München.
- Härtel, H. (2012). Der alles andere als einfache elektrische Stromkreis. *Praxis der Naturwissenschaften Physik in der Schule*, 61(5), 17–24.
- Herrmann, F., & Schmälzle, P. (1984). Das elektrische Potential im Unterricht der Sekundarstufe I. *Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht*, 37(8), 476–482.
- Hindriksen, A., Kahnt, M., & Berger, R. (2023). Lernwirksamkeit von Analogiemodellen zum elektrischen Potenzial. *PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*. <https://ojs.dpg-physik.de/index.php/phydid-b/article/view/1340>
- Ivanjek, L., Morris, L., Schubatzky, T., Hopf, M., Burde, J.-P., Haagen-Schützenhöfer, C., Dopatka, L., Spatz, V., & Wilhelm, T. (2021). Development of a two-tier instrument on simple electric circuits. *Physical Review Physics Education Research*, 17(2), 020123. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEduRes.17.020123>
- Jung, W. (1992). Probing Acceptance, A Technique for Investigating Learning Difficulties. In R. Duit, F. Goldberg, & H. Niedderer (Hrsg.), *Research in Physics Learning: Theoretical Issues and Empirical Studies* (S. 278–295).
- Kahnt, M. (2022). Die Fahrradkette als durchgängige Vorstellungshilfe im Elektrizitätslehreunterricht der Sekundarstufe I. *plusLucis*, 2, 14–21.
- Koller, D., Waltner, C., & Wiesner, H. (2008). Zur Einführung von Stromstärke und Spannung. *Praxis der Naturwissenschaften-Physik in der Schule*, 57(6), 6–18.
- Kuckartz, U., & Rädiker, S. (2022). *Qualitative Inhaltsanalyse: Methoden, Praxis, Computerunterstützung: Grundlagentexte Methoden* (5. Auflage). Beltz Juventa.
- Leibfarth, K., Gottschlich, B., & Burde, J.-P. (2024). Modelle des einfachen Stromkreises in der Sekundarstufe I in Baden-Württemberg. *PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*. <https://ojs.dpg-physik.de/index.php/phydid-b/article/view/1449>
- Morris, L., & Hopf, M. (2022). Energieübertragung in elektrischen Systemen mithilfe von elektromagnetischen Feldern erklären. https://www.gdcp-ev.de/wp-content/tb2022/TB2022_556_Morris.pdf
- Müller, R., & Mandler, J. (2022). Stromkreise besser verstehen mit Potenzial und Bikepark-Analogie. *plusLucis*, 2, 8–13.
- Oh, P. S., & Oh, S. J. (2011). What Teachers of Science Need to Know about Models: An overview. *International Journal of Science Education*, 33(8), 1109–1130. <https://doi.org/10.1080/09500693.2010.502191>
- Psillos, D., Tiberghien, Andrée, & and Koumaras, P. (1988). Voltage presented as a primary concept in an introductory teaching sequence on DC circuits. *International Journal of Science Education*, 10(1), 29–43. <https://doi.org/10.1080/0950069880100104>
- Schubatzky, T. (2020). *Das Amalgam Anfangs-Elektrizitätslehreunterricht: Eine multiperspektivische Betrachtung in Deutschland und Österreich*. Logos Verlag Berlin. <https://doi.org/10.30819/5159>
- Schwedes, H., & Dudeck, W.-G. (1993). Lernen mit der Wasseranalogie: Eine Einführung in die elementare Elektrizitätslehre. *Naturwissenschaften im Unterricht Physik*, 4(16), 16–23.
- Schwedes, H., & Schilling, P. (1983). Schülervorstellungen zu Wasserstromkreisen. *physica didactica*, 10(3/4), 172–183.
- Shipstone, D. M., von Rhöneck, C., Jung, W., Kärrqvist, C., Dupin, J.-J., Johsua, S., & Licht, P. (1988). A study of students' understanding of electricity in five European countries. *International Journal of Science Education*, 10(3), 303–316. <https://doi.org/10.1080/0950069880100306>
- Urban-Woldron, H., & Hopf, M. (2012). Entwicklung eines Testinstruments zum Verständnis in der Elektrizitätslehre. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 18, 201–227.
- von Rhöneck, C. (1986). Vorstellungen vom elektrischen Stromkreis. *Naturwissenschaften im Unterricht Physik*, 34(13), 10–14.
- Wodzinski, R. (2013). Lernhilfe oder Lernhinderung?: Modelle von Leitungsvorgängen in Stromkreisen unter der Lupe. *Naturwissenschaften im Unterricht Physik*, 23(133), 12–16.
- Wodzinski, R., & Wiesner, H. (1996). Akzeptanzbefragungen als Methode zur Untersuchung von Lernschwierigkeiten und Lernverläufen. In R. Duit & C. von Rhöneck (Hrsg.), *Lernen in den Naturwissenschaften: Beiträge zu einem Workshop an der Pädagogischen Hochschule Ludwigsburg* (S. 250–274).

Komplementär vernetzte Bildungsangebote erforschen

Jonas Tischer* & Michael Komorek*

*Didaktik der Physik und Wissenschaftskommunikation Universität Oldenburg
jonas.tischer@uni-oldenburg.de

Kurzfassung

Angebote außerschulischer Lernstandorte weisen ein großes Potenzial für die Erweiterung schulischer Bildung auf. Dieses wird von Schulen und Lehrkräften zwar erkannt, jedoch häufig nicht ausgeschöpft. Ein Grund dafür ist, dass die Besuche an den Lernstandorten im Unterricht nicht hinreichend vor- und nachbereitet werden und die unterrichtliche Einbettung damit unterbewertet wird. Das Projekt ReBiS (Regionales MINT-Bildungsökosystem) nimmt sich dieser Problematik an. Bei ReBiS wird ein Konzept entwickelt und erprobt, wonach außerschulische Angebote explizit in den Fachunterricht eingebettet werden, um Schüler:innen an Themen heranzuführen, die für den regulären Unterricht meist zu komplex sind. Mehrere Fächer und mehrere außerschulische Lernstandorte vernetzen sich mit ihren Bildungsangeboten in komplementärer Weise, d. h. einander ergänzend oder im Kontrast zueinander. Zusammengenommen bieten die Perspektiven der Fächer und der Lernstandorte einen multidisziplinären Zugang zu komplexen Problemkontexten, wie sie der Klimawandel, die Veränderungen im Küstenraum, die Ambivalenz von Kunststoffen etc. darstellen. An ReBiS beteiligen sich vier Schulen und sechs außerschulische Lernstandorte aus dem Raum Wilhelmshaven und Oldenburg. ReBiS wird von der Deutschen Telekom Stiftung im Programm ‚Chancen bilden‘ gefördert.

Dieser Beitrag setzt nach einer Darstellung des Projektansatzes den Fokus auf die begleitende Forschung. Es werden subjektive Überzeugungen der beteiligten Bildungsanbietenden zur Rolle außerschulischen Lernens und der Einbettung in den Fachunterricht erhoben sowie die jeweiligen Umsetzungen des ReBiS-Ansatzes in den Schulen und die Wahrnehmungen der Schüler:innen erfasst.

1. Komplexe Herausforderungen unserer Gesellschaft im Bildungssystem

Die Herausforderungen, denen sich unsere Gesellschaft gegenüber sieht, unterliegen einer hohen Komplexität, denn erst eine Vielzahl von Perspektiven erlaubt es, diese Herausforderungen umfassend zu verstehen und sich mit Lösungen zu befassen. Beispiele für solche Herausforderungen sind der Klimawandel, eine nachhaltige Energieversorgung oder die Vor- und Nachteile von Kunststoffen.

Bildung muss auf den Umgang mit solchen Herausforderungen vorbereiten. Da es dafür also viele aufeinander zu beziehende Perspektiven braucht, fällt es Schulen aufgrund der separierten Schulfächer offenbar schwer, die Komplexität der Herausforderungen, d. h. der komplexen Problemkontexte zu fassen. Hilfreich wäre ein fächerverbindender Unterricht; bezogen auf einen Problemkontext wie den Klimawandel wäre die Verbindung etwa von Physik-, Biologie- und Geografieunterricht denkbar. Der Physikunterricht würde die physikalischen Zusammenhänge des Klimawandels und die Nutzung Erneuerbare Energie als eine Lösung thematisieren, der Geografieunterricht die regionalen und globalen Auswirkungen des Klimawandels auf Mensch und Wirtschaft und der Biologieunterricht seine Folgen für Flora und Fauna problematisieren. Doch solche wünschenswerten Ansätze sind zwar seit den 70er Jahren des letzten Jahrhunderts diskutiert, aber nie durchgängig umgesetzt worden (Labudde & Schecker, 2021).

Außerschulische Bildungsangebote können in dieser Situation Schulen helfen, Interdisziplinarität auch ohne formal verbundene Fachunterrichte zu erreichen. Denn die Angebote der außerschulischen Lernorte sind per se interdisziplinär ausgerichtet, indem sie sich nicht auf einzelne Unterrichtsfächer der Schule abbilden lassen. Dadurch bieten sie die Chance, komplexe Problemkontexte komplexer anzugehen, als es die Schule leisten kann. Mit einer Kombination mehrerer außerschulischer Angebote kann dies umso besser gelingen. Zudem führt erst die mehrmalige Nutzung außerschulischer Lernorte zu einem langfristigen Effekt hinsichtlich Interesse oder fachlichen Lernens (z. B. Nickolaus & Mokhonko, 2017; Molz et al., 2022).

An dieser Situation setzt das Projekt ReBiS an. Grundidee ist, dass eine Schulklasse über ein Schuljahr hinweg einen komplexen Problemkontext bearbeitet, und zwar nacheinander in unterschiedlichen Fächern. Dies umgeht das Problem, dass echte Fächerverbindungen in der Schule nicht gelingt. Dennoch sind bei ReBiS die Fächer über das Thema verbunden, das sequenziell in den einzelnen Fächern bearbeitet wird. Zudem werden bei ReBiS aus den einzelnen Fächern heraus jeweils außerschulische Lernorte besucht, deren Angebote die tendenziell enge Perspektive des jeweiligen Faches erweitern. Damit diese Erweiterung gelingt, werden die Besuche der einzelnen Lernorte im jeweiligen Schulfach systematisch vor- und nachbereitet. Und durch das außer-

schulische Lernangebote kommen neue Perspektiven hinzu. Grundsätzlich zielt der ReBiS-Ansatz auf eine systematische Kontextualisierung des Bildungsprozesses (Nawrath, 2010), was dadurch erreicht wird, dass die gewählten Problemkontexte eine Breite aufweisen und damit Schulfächern wie außerschulischen Lernorten vielfältige Anknüpfungspunkte bieten. Gleichzeitig weisen komplexe Problemkontexte auch ein hohes Motivationspotenzial für die Schüler:innen auf (Lewalter & Geyer, 2009).

2. Komplementäre Vernetzung schulischer und außerschulischer Angebote

Das beschriebene Vorgehen wird als komplementäre Vernetzung schulischer und außerschulischer Angebote bezeichnet (Sajons & Komorek, 2020; Richter et al., 2018). Bildungsangebote sind dann komplementär vernetzt, wenn sie sich gegenseitig ergänzen oder aber explizit in einem Kontrast zueinander stehen, also jeweils eine Gegenposition bilden, die ggf. auch affektiv getönt ist. Komplementäre Vernetzung meint zweierlei; zum einen die Vernetzung mehrerer Bildungsangebote verschiedener außerschulischer Lernangebote. In der Frühphase des Projekts haben daher die beteiligten Lernorte in ihren Angeboten Anknüpfungen und Gegensätze herausgearbeitet und dann gemeinschaftlich den Schulen ein komplementär vernetztes Bildungsangebot unterbreitet. In einer Projektwoche (Tischer, 2020) wurde dieses Angebot, das insbesondere Dilemmata als methodische Elemente umfasste, mit mehreren Schulen erprobt. Eine explizite Einbettung des komplementär vernetzten Angebots in den Schulunterricht fand zu dem Zeitpunkt noch nicht statt, was sich als Problem erwies, denn die Projektwoche wurde von den Schüler:innen als losgelöst vom regulären Unterricht wahrgenommen (Tischer, 2020). Zum anderen bedeutet komplementäre Vernetzung, dass die schulischen und die außerschulischen Angebote aufeinander bezogen werden. Schule und außerschulische Lernorte stehen dann komplementär zueinander. Auch in der zweiten Lesart der komplementären Vernetzung sind die außerschulischen Bildungsangebote hinsichtlich des gewählten komplexen Problemkontext aufeinander bezogen. Hinzu kommt nun aber eine systematische Einbettung des Außerschulischen in das Schulische. Methodisch spielen hierbei wiederum Dilemmata eine wichtige Rolle. Einer systematischen Vor- und Nachbereitung wird generell ein positiver Effekt auf das fachliche Lernen (z. B. Reimann et al., 2014; Molz et al., 2022) und das Interesse zugesprochen (z. B. Derda, 2020).

Die bei ReBiS beteiligten außerschulischen Lernorte sind das Regionale Umweltzentrum in Schortens sowie in Wilhelmshaven der Botanische Garten mit dem Verein grün&bunt, das Küstenmuseum, das Wattenmeer Besucherzentrum und der Lernort Technik und Natur. Hinzu kommt in Oldenburg das Schülerlabor physixS, das an die Physikdidaktik der Universität Oldenburg angesiedelt ist.

Gemeinsam können diese Orte mit ihren Bildungsangeboten eine Vielzahl an Perspektiven abdecken und neben naturwissenschaftlich-technischen auch historische, soziologische oder ethische Perspektiven einnehmen. Beteiligte Schulen sind die IGS Wilhelmshaven, das Neue Gymnasium Wilhelmshaven sowie die Oberschule Mitte aus Wilhelmshaven und die Oberschule Varel.

2.1. Umsetzungsprozess bei ReBiS

Das Projekt startet in jeder Schulklasse damit, dass die Klasse einen komplexen Kontext als ihren Problemkontext auswählt, mit dem sie sich über ein Schuljahr hinweg befassen wird. Die „Klasse“ umfasst hierbei die Schüler:innen, aber auch die Lehrkräfte der beteiligten Fächer. Beispiele für gewählte Kontexte in den Jahren 2022 bis 2025 sind „Nachhaltige Nutzung von Rohstoffen“, „Konsum und seine Folgen“, „Herausforderung Leben im Klimawandel“ sowie „Fluch und Segen von Kunststoffen“. Ist der Problemkontext gewählt, werden Fragestellungen und „Phänomene“ gesammelt, die die Klasse in diesem Schuljahr klären will. Es werden Wünsche und Ideen formuliert und passend dazu unter den mitwirkenden Lernorten solche ausgesucht, die inhaltlich bzw. methodisch zu den gestellten Fragen passen. Im Gegenzug machen die Lernorte Vorschläge für aufeinander bezogene Angebote und unterbreiten Ideen, inwiefern Angebote vernetzt werden und in den Unterricht der einzelnen Fächer eingebettet werden könnten. Nun beginnt das erste Schulfach, den komplexen Problemkontext zu bearbeiten und dabei eines der außerschulischen Angebote einzubetten. Nach einer gewissen Zeit übergibt die erste Fachlehrkraft an die zweite, die wiederum ihren Zugang zum Problemkontext und ihren außerschulischen Lernort wählt. Es ergibt sich eine Art „Staffellauf“, der die Verbindung der Fächer repräsentiert, wobei das jeweils vorhergehende Fach wieder in den Hintergrund tritt. Diese Struktur der Vernetzung ist in Abbildung 1 dargestellt.

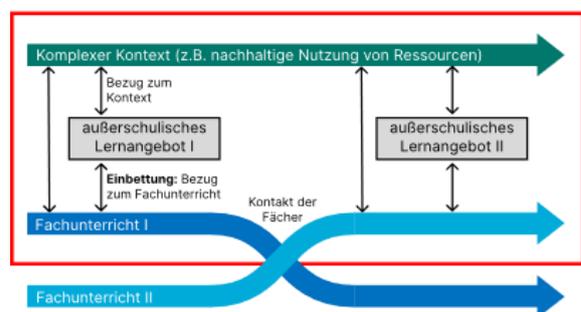


Abb. 1: Darstellung der strukturellen Vernetzung von Fachunterricht in den Schulen und außerschulischen Angeboten (eigene Darstellung aus Tischer & Komorek, angenommen).

Der Ablauf ist der folgende: In einem Schulfach (hier der dunkelblaue Pfeil in Abbildung 1) wird zunächst

der komplexe Problemkontext eröffnet und eine fachspezifische Perspektive darauf eingenommen. Dabei prüft die Lehrkraft zunächst, inwiefern durch die Bearbeitung des Problemkontextes auch die Forderungen der Schul- und Kerncurricula erfüllt sind. Denn die Mitwirkung im ReBiS-Konzept soll nicht im Widerspruch zu den Curricula stehen, sondern sie vielmehr variantenreich erfüllen und auch über sie hinausgehen.

Durch die Kombination aus außerschulischem Bildungsangebot und Fachunterricht werden also vielfältige Perspektiven auf den komplexen Problemkontext (z. B. „Veränderungen im Küstenraum“) eingenommen. Wenn eine Lehrkraft an die nächste übergibt (hellblauer Pfeil in Abbildung 1), wird dies fortgesetzt. Die Verantwortlichkeit der beteiligten Lehrkräfte wird somit auf viele Schultern verteilt, weil jedes Fach nur mit wenigen Wochen beteiligt ist und sich die subjektiv wahrgenommene Belastung der Lehrkräfte, die immer aufkommt, wenn ein neues Format erprobt wird, in Grenzen hält.

Pro Schuljahr können mit diesem Vorgehen erfahrungsgemäß vier bis fünf Schulfächer am Projekt partizipieren. Damit sich das Vorgehen im Projekt auch aus der Sicht der Schüler:innen als zusammenhängend darstellt, sind zwei methodische Elemente integriert.

Das erste Element besteht darin, dass die Schüler:innen ihren gedanklichen Prozess über die mehreren Schulfächer hinweg dokumentieren. Sie erhalten eine übergreifende Aufgabe, die sie sich selbst stellen und die in gewisser Weise auch wieder die gewünschte Fächerverbindung repräsentiert. Die Dokumentation durch die Schüler:innen ist so angelegt, dass sie sie im jeweils folgenden Schulfach wieder aufgreifen können. Eine der beteiligten Schulklasse hat z. B. eine digitale Pinwand eingesetzt, die immer weiterwuchs und damit den Erkenntnisprozess und die Erfahrungen der Schüler:innen über einen langen Zeitraum widerspiegelte. In einem anderen Fall kamen von Schüler:innen selbst gedrehte Videos zum Einsatz. In einem dritten Fall wurde eine Glasvitrine im Flur vor dem MINT-Fachräumen nach und nach mit Exponaten, die die Schüler:innen im Unterricht erstellt oder gesammelt hatten, gefüllt.

Das zweite methodische Element war die Herausarbeitung sogenannter „Cliffhanger“. Im Unterricht wird dabei eine Fragestellung herausgearbeitet (hierbei lenkt die Lehrkraft), die offensichtlich im Rahmen des Schulfachs nicht weiter beantwortet werden kann („hier kommen wir nicht weiter“) und für deren Beantwortung der Besuch eines außerschulischen Lernstandort notwendig wird („wie müssen ins Watt, um den Einfluss des Klimawandels auf die Tiere und Pflanzen an der Küste zu verstehen“). Am Ende der Exkursion wird dann wiederum eine Frage oder Aufgabe virulent, deren Beantwortung den Weg zurück in den Unterricht benötigt („das müssen wir uns in der Schule genauer ansehen“). Beispiele können

systematische experimentelle Untersuchungen sein, die am außerschulischen Lernort nicht möglich sind, in der Schule aber schon.

2.2. Beispiel einer Umsetzung

Im Kontext der „Herausforderung Leben im Klimawandel“ erfolgte in einer der beteiligten Schulklassen im Erdkundeunterricht die Thematisierung des Klimawandels, indem der Treibhauseffekt und dessen globale Auswirkung bearbeitet wurden. Der Cliffhanger erforderte dann, das Wattenmeer Besucherzentrum aufzusuchen, das die lokalen Auswirkungen des Klimawandels auf die Küstenregion und zusätzlich globale Folgen für die Meere aufgriff. Dieser Lernort bot mit der Untersuchung des Wattbodens an der Küste ein Element, das über den Unterricht hinausging. Es folgte in der Schule der Physikunterricht, der physikalische Aspekte des Klimawandels aufgriff, um danach das Angebot „Wir planen einen Windpark“ des Lernort Technik und Natur aufzusuchen. Dort lernten die Schüler:innen kennen, wie ein Windpark geplant wird und welche Faktoren dabei zu beachten sind, etwa die Auswahl des Standortes und wie die Windkraftanlagen zueinander stehen müssen, um maximalen Ertrag zu erhalten. Auch gesellschaftliche Dilemmata zwischen Energieversorgung und Umweltschutz spielten dabei eine Rolle. Prozesse der Energieumwandlung, die die Anbindung an den Physikunterricht ermöglichten, wurden ebenfalls thematisiert.

In der Schule übernahm dann Ökonomieunterricht und arbeitete aus einer gesellschaftswissenschaftlichen und ökonomischen Perspektive Fragen des Tourismus und dessen Auswirkungen auf (Tischer & Komorek, angenommen).

3. Begleitende Forschung im Projekt ReBiS

Neben dem Entwicklungsanteil umfasst ReBiS auch die begleitende Forschung, um die Angebote zu optimieren und Ergebnisse zu generalisieren. Diese Forschung umschließt drei Ebenen (vgl. Abbildung 2).

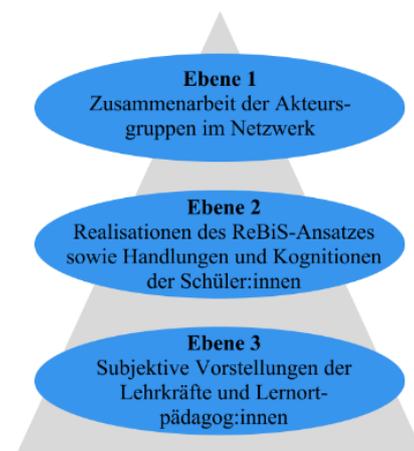


Abb. 2: Drei Ebenen der Begleitforschung (eigene Darstellung)

Auf der ersten Ebene wird untersucht, wie die Akteure im Netzwerk zusammenarbeiten, wie sie sich aus ihren jeweiligen unterschiedlichen Bildungskulturen heraus inhaltlich und methodisch vernetzen und welche fördernden und hemmenden Faktoren dabei eine Rolle spielen.

Auf der zweiten Ebene wird erhoben, wie die Umsetzungen an den einzelnen Schulen bzw. Schulkassen stattfindet und wie dabei jeweils die außerschulischen Bildungsangebote in den Fachunterricht eingebettet werden. Diese Forschungsebene ist deswegen wichtig, weil jede Schule ihren eigenen „Kosmos“ bildet, mit eigenen Regeln und eigener Schulkultur. Es ist das Ziel, aus der Vielzahl der individuellen schulischen Umsetzungen generalisierbare Aussagen über die Umsetzung des ReBiS-Konzepts zu gewinnen, um den späteren Transfer auf weitere Schulen vorzubereiten. Auf dieser Forschungsebene wird auch die Wahrnehmungen des ReBiS-Ansatzes durch die Schüler:innen untersucht; insbesondere wird der Frage nachgegangen, inwiefern sie die verschiedenen Angebote im Unterricht und an den außerschulischen Lernorten als zusammenhängend wahrnehmen.

Auf der dritten Ebene werden die subjektiven Überzeugungen der Lehrkräfte und Pädagog:innen der außerschulischen Lernorte erhoben. Es wird untersucht, welche Bedeutung sie dem außerschulischen Lernen bei der Erschließung komplexer Problemkontexte zuweisen und wie sie Bedingungen der Einbettung des Außerschulischen in das Schulische beurteilen.

Die Ergebnisse auf den drei Forschungsebenen werden schließlich aufeinander bezogen, um Gelingensbedingungen für die Umsetzung des ReBiS-Konzepts, auch mit Blick auf den Transfer, formulieren zu können. Es interessiert dabei besonders, wie die subjektiven Überzeugungen der Beteiligten die Umsetzung pro Schule bzw. pro Schulklasse mit beeinflussen.

3.1. Methodik

Die Methodik ist auf die Frageebenen abgestimmt. Bei der Forschungsfrage bzgl. der subjektiven Überzeugungen der Lehrkräfte wird auf ein Interviewdesign zurückgegriffen, bei dem die beteiligten Lehrkräfte zu zwei Zeitpunkten befragt werden. Zuvor wird jeweils ein kurzer Fragebogen an die Lehrkräfte verteilt, um sie auf das Interview einzustimmen.

Für die Interviews ist jeweils ein Leitfaden entwickelt worden, der die oben angesprochenen Überzeugungen bzgl. der Rolle außerschulischen Lernens, der Bedeutung komplexer Problemkontexte und der Einbettung außerschulischer Bildungsangebote in den Fachunterricht umfasst.

Items bei der Befragung von Lehrkräften zum ersten Zeitpunkt (vor ihrer Übernahme der Schulklasse im „Staffellauf“) waren die folgenden (Auszug):

- Inwiefern unterstützen außerschulische Lernangebote das Lernen von Schüler:innen und wie ergänzen sie deinen Fachunterricht?

- Wie kann Schulunterricht bzw. wie können außerschulische Lernangebote deine Schüler:innen beim Umgang mit komplexen Problemkontexten unterstützen?
- Wie kann die längerfristige Dokumentationsaufgabe den Schüler:innen helfen, den komplexen Problemkontext über das Schuljahr hinweg wachzuhalten?
- Wie lassen sich die Lernangebote der außerschulischen Lernorte in den Fachunterricht einbetten und welchen Mehrwert hat eine systematische Einbettung für die Schüler:innen?

Für die zweite Befragung der Lehrkräfte wurden die Fragen stärker darauf bezogen, welche Erfahrungen die Lehrkräfte in der Projektlaufzeit gemacht haben. Fragen waren unter anderen:

- Inwiefern haben außerschulische Lernangebote im Projektzeitraum das Lernen von Schüler:innen in deinem Unterricht unterstützt?
- Inwiefern haben außerschulische Lernangebote deinen Fachunterricht im Projektzeitraum ergänzt?
- Inwiefern haben es die bei ReBiS komplementär vernetzten Angebote geschafft, die Schüler:innen an die komplexen Problemkontexte heranzuführen?

Die Antworten der Lehrkräfte aus dem ersten Interview waren im zweiten Interview ein hilfreicher Trigger, um nachzuhaken. Auf Seiten der Lehrkräfte wurden 14 Interviews zum ersten Befragungszeitpunkt und elf zum zweiten Zeitpunkt geführt.

Von den Lernortpädagog:innen wurden insgesamt neun Personen befragt. Der hier genutzt Leitfaden ähnelt dem für die Lehrkräfte, beinhaltet jedoch stärker die Perspektive des Lernorts:

- Wie können außerschulische Lernorte Schulen beim Umgang mit komplexen Problemkontexten unterstützen?
- Wie müssten Schulen den Besuch an eurem Lernorten vorbereiten, damit er für die Schüler:innen ertragreich ist?
- Wie sollten Schüler:innen an den Schulen mit dem bei euch Gelernten weiterarbeiten?

Von den ca. 220 teilnehmenden Schüler:innen haben 146 einen Fragebogen bearbeitet, 35 Schüler:innen wurden zudem per Interview befragt. Interviewfragen an die Schüler:innen waren unter anderem:

- An welchen Lernorten seid ihr gewesen? Was habt ihr dort gemacht? Was verbindet die Aktivitäten der verschiedenen außerschulischen Lernorte, die ihr besucht habt?
- Wie habt ihr euch im Unterricht auf die Besuche der Lernorte vorbereitet?
- Wie passt das, was ihr an den Lernorten gemacht habt, zum dem, was im Unterricht passiert ist?

- In welchen Fächern habt ihr was zu den Lernorten gemacht? Passen die Fächer zusammen?
- Wie habt ihre eure Ergebnisse über das Schuljahr hinweg festgehalten?

Es werden außerdem Feldnotizen bei 29 Hospitationen im Schulunterricht der beteiligten Klassen und bei deren Besuchen außerschulischer Lernorte gemacht. Das Beobachtungsraster umfasste u. a. folgende Items:

- Wie werden Aufträge/Aufgaben durch die Lehrpersonen am Lernort/der Schule den Schüler:innen motiviert/erklärt/formuliert?
- Inwiefern wird der aktuelle/vorherige Lernortbesuch/Unterricht (hinsichtlich des komplexen Problemkontextes und der Vernetzung) zusammen mit den Schüler:innen reflektiert?
- Welche Fragen und Bedarfe äußern die Schüler:innen? Wie nutzen sie die Aufgaben und Materialien, um den Problemkontext zu erschließen?

Die Daten wurden einer qualitativen Inhaltsanalyse (Kuckartz & Rädiker, 2022) unterzogen. Hinsichtlich der subjektiven Überzeugungen von Lehrkräften werden lediglich die Interviewdaten als Datenpool zur Kategorienbildung genutzt. Die erhobenen Fragebogendaten dienen deskriptiv quantitativ als unterstützendes Element, denn eine quantitative Auswertung ist aufgrund der geringen Stichprobe nicht zielführend. Drei deduktiven Kategorien wurden durch induktive Kategorien aus dem Datenmaterial ausdifferenziert. Diese deduktiven Kategorien orientierten sich an den Forschungsfragen hinsichtlich der subjektiven Überzeugungen der Lehrkräfte,

- wie sie die Bedeutung außerschulischen Lernens generell einschätzen,
- welche Möglichkeiten der Einbettung außerschulischer Bildungsangebote und schulische sie favorisieren
- und inwiefern komplexer Problemkontexte, die gemeinschaftlich von Schule und außerschulischen Lernorten aufgegriffen werden, als lernförderlich für ihre Schüler:innen einstufen.

Bezüglich der Forschungsfrage zu den Wegen der Umsetzung des ReBiS-Ansatzes wird ein Design gewählt, das qualitative Interviews und einen ethnografischen Ansatz (Thomas, 2019) (repräsentiert durch die Feldnotizen und Befragungen) miteinander verknüpft. Auch hier wird die qualitative Inhaltsanalyse (Kuckartz & Rädiker, 2020) angewendet.

3.2. Subjektive Überzeugungen von Lehrkräften

Bezüglich der subjektiven Überzeugungen der Lehrkräfte sind eine Vielzahl von Kategorien herausgearbeitet worden, von denen exemplarisch vier vorgestellt werden. Davon beziehen sich die ersten beiden auf subjektive Überzeugungen von Lehrkräften hinsichtlich der Bedeutung außerschulischen Lernens und zwei weitere auf deren subjektive

Überzeugungen zur Einbettung der außerschulischen Angebote in den Fachunterricht:

Kategorie: Außerschulische Angebote unterstützen das Lernen der Schüler:innen

Es lässt sich grundsätzlich festhalten, dass die beteiligten Lehrkräfte Besuchen außerschulischer Lernstandorte positiv gegenüberstehen. Außerschulischen Angeboten wird zugeschrieben, Beispiele und thematische Vertiefungen für den Unterricht beizusteuern, sowie thematisches und allgemeines Interesse zu fördern. Insbesondere sehen Lehrkräfte außerschulische Lernstandorte als Orte, die andere Zugänge zu Lerngegenständen schaffen. So äußern Lehrkräfte, dass sie die besonderen Zugänge schätzen, die durch die Ausstattung, das Personal oder den Ort an sich geschaffen werden. Aus der Perspektive der Lehrkräfte besitzen außerschulische Angebote insgesamt eine besondere Funktion, die das schulische Lernen ergänzt:

Sie unterstützen es [das Lernen] in dem Sinne, dass sie es vor allen Dingen auch erweitern, weil viele Sachen am Lernort passieren, die wir in der Schule gar nicht machen oder auch gar nicht machen können.
(LK1_3_I1_2023.03.30, Pos. 5)

Kategorie: Besuche außerschulischer Lernorte unterbrechen den Lernprozess

Dem gegenüber steht eine Kategorie, die aussagt, dass der Besuch außerschulischer Angebote auch hinderlich hinsichtlich der Ziele des Unterrichts sein kann. Lehrkräfte sehen einen deutlich erhöhten Aufwand durch Planungsaufgaben. Auch wird eine Unruhe im Lernprozess der Schüler:innen unterstellt, beispielsweise durch ausfallenden Unterricht. Der Besuch eines außerschulischen Angebots bringt für diese Lehrkräfte gängige Strukturen im Lehr- und Lernprozess der Schule durcheinander:

Im Schulalltag gilt es halt unterzubringen und den, wie soll man sagen, den Unterricht in seiner Kontinuität auch in den anderen Fächern nicht zu sehr zu stören.
(LK2_3_I1_2023.03.16, Pos. 19)

Kategorie: Besuche außerschulischer Angebote benötigen eine (kognitive) Entlastung der Schüler:innen bereits in der Schule

Es zeigt sich, dass Lehrkräfte die Notwendigkeit einer Vorbereitung bzw. Einbettung erkennen. So wird geäußert, dass Schüler:innen das außerschulische Angebot insbesondere dann besser fassen können, wenn der Besuch im Unterricht so vorbereitet wird, dass die Schüler:innen dort das zum Verständnis des Angebots benötigte Vorwissen aufbauen. Dies sei als eine Entlastung zu verstehen, da der Besuch des außerschulischen Lernorts ansonsten kognitiv überlasten könnte, wie folgendes Zitat illustriert:

„Wenn ich blind mit den Schülern in irgendeinen außerschulischen Lernort gehe, stelle ich mir das sehr schwierig vor, gerade auch

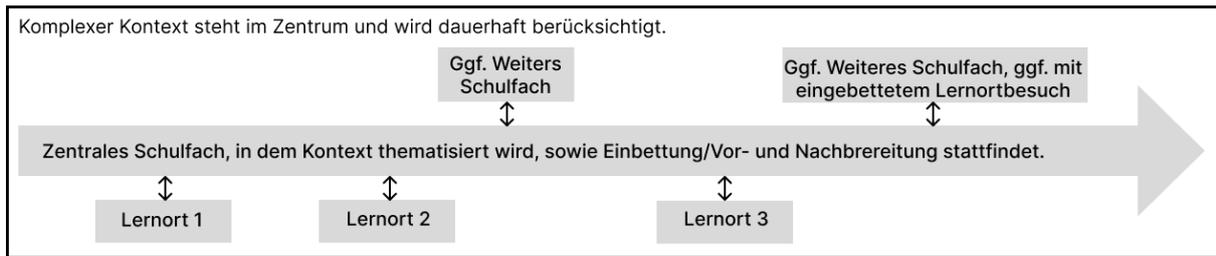


Abb. 3: Weg der Umsetzung des ReBiS-Ansatzes. Ein zentrales Schulfach steht im Zentrum und strukturiert die Vernetzung von Fachperspektiven und Lernortangeboten. (Eigene Darstellung)

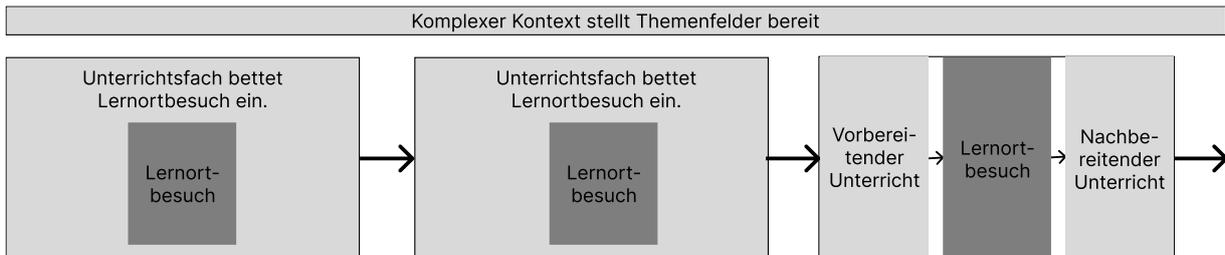


Abb. 4: Weg der Umsetzung des ReBiS-Ansatzes. Außerschulische Angebote sind eingebettet, die Vernetzung der Perspektiven und Angeboten wird weniger fokussiert. (Eigene Darstellung)

bei uns in unserer Schulform. Weil ein Thema sollte schon entsprechend vorentlastet sein, weil sie viele Wörter, auch gerade aufgrund unseres hohen Anteils an Schülern mit Migrationshintergrund, Schwierigkeiten haben, die Sachstruktur zu erkennen.“ (LK4_1_I2_2024.04.17_Teil_I, Pos. 33)

Die Einbettung der Lernortangebote in den Fachunterricht ist aus der Perspektive der Lehrkräfte also ein wesentliches Element, um die Schüler:innen zu unterstützen, die komplexen Herausforderungen zu erfassen und zu verstehen.

Kategorie: Je nach Lernziel sind differenzierte Formen der Einbettung notwendig

Hervorzuheben ist, dass die beteiligten Lehrkräfte die Art und Weise der Einbettung von ihren Lernzielen abhängig machen, die mit dem jeweiligen Lernortbesuch verbunden sind.

So wird herausgestellt, dass bei fehlender fachbezogener Einbettung vor allem soziale Faktoren einer Exkursion im Vordergrund stehen wie der Zusammenhalt in der Schulklasse. In einem solchen Fall sei eine fachliche Einbettung nicht notwendig. Eine explizite fachbezogene Einbettung der Exkursion in den Fachunterricht stärke aber die Bildung von Zusammenhangswissen. Die Form der Einbettung hänge somit auch davon ab, mit welchen Lernzielen ein Angebot eines außerschulischen Lernstandorts besucht werde, wie folgendes Zitat verdeutlicht:

„Also, wir fahren auch zu Lernorten. Ich sag mal, was weiß ich, wenn wir in [...] Zoo fahren in Jahrgang 5, dann ist das unterrichtlich nicht eingebettet. Hat dann aber auch andere Zielsetzungen.“ (LK1_1_I1_2023.05.03, Pos. 47)

3.3. Wege der Umsetzung des ReBiS-Ansatzes

Bezüglich der Wege der Umsetzung des ReBiS-Ansatzes lassen sich drei Varianten unterscheiden. Zu berücksichtigen ist dabei, dass die Art und Weise der Umsetzung auch pro Schulklasse variierte. Dies war jeweils abhängig von der Zusammensetzung des Lehrkräfteteams, deren Vorlieben und von äußeren Umständen der Schulorganisation, auf die die Lehrkräfte flexibel reagieren mussten. Im Folgenden sind daher Wegelemente herausgearbeitet, die flexible zum Einsatz kamen.

Gemäß dem ReBiS-Ansatz ist idealtypisch ein Weg der Umsetzung vorangelegt, wie er in Abbildung 1 dargestellt ist. Die Schulfächer bearbeiten den gemeinsamen Problemkontext, es gibt eine Übergabe zwischen den Lehrkräften bzw. Schulfachern, wobei jeweils ein Schulfach bei der Bearbeitung des Problemkontextes im Vordergrund steht und ein außerschulisches Bildungsangebot wird eingebettet. Diese Umsetzung konnte tatsächlich in einzelnen Schulklassen beobachtet werden.

In einem zweiten Weg der Umsetzung wirkten neben klassischen Schulfachern auch nicht-klassische Fächer bzw. Kurse mit, wie „Soziales Lernen“ oder „Profilkurse“. Diese waren dann meist das koordinative Zentrum der Umsetzung und haben die Auslagerung bestimmter Aktivitäten in die klassischen Unterrichtsformate und außerschulischen Lernorte organisiert (vgl. Abbildung 3). Beispielsweise wurde in einem Profilkurs der komplexe Problemkontext ‚Nachhaltige Nutzung von Ressourcen‘ eröffnet und vom Profilkurs aus wurden erforderliche fachbezogene Perspektiven eingenommen. Auch wurden in den Profilkurs außerschulische Angebote eingebettet. Zudem wurden aus dem Profilkurs Bezüge zu klassischen Unterrichtsfächern hergestellt, indem auch dort

der Problemkontext aufgegriffen wurde (hier also kein „Staffellauf“, sondern eine Integration von Profilkurs und klassischem Schulfach). Besonders präsent war in einer solchen Umsetzung im Profilkurs die längerfristige Aufgabe, die auch den Zweck der Dokumentation erfüllte und die die Schüler:innen über das Schuljahr hinweg bearbeiten sollten. In diesem Fall bestand die Aufgabe darin, ein besonders ressourcenschonendes Gebäude, das auf dem Schulgelände errichtet werden sollte, zu entwerfen. Die einzelnen Beiträge der Fächer und der außerschulischen Lernorte dienten dazu, verschiedene Perspektiven auf eine nachhaltige Ressourcennutzung einzunehmen. Die außerschulischen Bildungsangebote setzten dabei z. B. auf die Dilemma-behafteten Anforderungen des Klimaschutzes. Dieses Beispiel zeigt, wie flexibel Lehrkräfte den idealtypischen ReBiS-Ansatz an ihre Schulrealität anpassen konnten.

Als eine weitere Umsetzung wurde beobachtet, dass einzelnen Schulfächer außerschulische Lernangebote zwar einbetten, also auch systematisch vor- und nachbereiten, dass diese aber die Verbindung zwischen den Fächern nicht aktiv betrieben, der „Staffellauf“ also eher ausbleibt. Dies wirkte sich eher negativ auf die schülerseitige Bearbeitung der längerfristigen vernetzenden Aufgabe aus (vgl. Abbildung 4). Beispielsweise wurde im Problemkontext ‚Herausforderung Leben im Klimawandel‘ im Erdkundeunterricht der Klimabegriff geklärt sowie als Lernort das Wattenmeer-Besucherzentrum besucht, wo die globalen Klimawandelfolgen eindrucksvoll dargestellt wurden. In einem nächsten Schritt wurde im Physikunterricht der Elektroantrieb im Kontext erneuerbarer Energien fokussiert. Ein Bezug zwischen beiden Fachunterricht und den außerschulischen Angeboten unterblieb aber. In der Dramaturgie des Kontexts entsteht ein Bruch und weitere Auswertungen der Daten müssen zeigen, inwiefern hier auch ein Bruch im Verständnis der Schüler:innen erfolgte.

4. Ausblick

Es wird deutlich, dass der ReBiS-Ansatz das Potenzial bietet, komplexe Problemkontexte multiperspektivisch für Schüler:innen erfahrbar zu machen.

Für den weiteren Verlauf des Projekts gilt es, den Ansatz zu optimieren und weiteren Schulen zur Verfügung zu stellen. In einem „ReBiS+“ werden dafür interessierten Schulen und Lehrkräften sowie Pädagog:innen außerschulischer Lernstandorte der Ansatz vorgestellt und sie werden unterstützt, ihn an ihre Bildungsrealitäten anzupassen; dies aufbauend auf den bisherigen Erfahrungen. Auch wird weiterhin verfolgt, wie der ReBiS-Ansatz an den bisher beteiligten Institutionen verstetigt werden kann. Erste Erfolge sind dabei, dass zwei der Schulen den Ansatz in ihr Schulcurriculum integriert haben.

Als ein Instrument für die Verstetigung und die Expansion wird ein praxisorientierter Leitfaden erstellt. Er zeigt Gelingensbedingungen für den Aufbau eines Netzwerks aus Schulen und außerschulischen Lern-

orten exemplarisch auf; und er zeigt, wie die komplementäre Vernetzung ablaufen kann und welche konkreten Handlungshinweise befolgt werden sollten.

5. Literatur

- Derda, M. (2020). Untersuchung der Unterrichtseinbindung eines Schülerlaborbesuches und der Erwartungen begleitender Lehrkräfte sowie teilnehmender Schülerinnen und Schüler. In K. Sommer, J. Wirth & M. Vanderbeke (Hrsg.), *Handbuch Forschen im Schülerlabor. Theoretische Grundlagen, empirische Forschungsmethoden und aktuelle Anwendungsgebiete.* (S. 151-158). Münster: Waxmann.
- Kuckartz, U. & Rädiker, S. (2022). *Qualitative Inhaltsanalyse. Methoden, Praxis, Computerunterstützung.* Weinheim: Beltz Juventa.
- Labudde, P. & Schecker, H. (2021). Unterrichtskonzeptionen für fächerübergreifenden naturwissenschaftlichen Unterricht. In T. Wilhelm, H. Schecker & M. Hopf (Hrsg.). *Unterrichtskonzeptionen für den Physikunterricht. Ein Lehrbuch für Studium, Referendariat und Unterrichtspraxis.* Springer-Spektrum.
- Lewalter, D. & Geyer, C. (2009). Motivationale Aspekte von schulischen Besuchen in naturwissenschaftlich-technischen Museen. *Zeitschrift für Erziehungswissenschaft* 12, 28-44.
- Molz, A., Kuhn, J. & Müller, A. (2022). Effectiveness of science outreach labs with and without connection to classroom learning: Affective and cognitive outcomes. *Physical review physics education research.* 18(2).
- Nawrath, D. (2010). Kontextorientierung – Rekonstruktion einer fachdidaktischen Konzeption für den Physikunterricht. (Beiträge zur Didaktischen Rekonstruktion, Bd. 29). Oldenburg: Didaktisches Zentrum.
- Nickolaus, R. & Mokhonko, S. (2017). Nachhaltige Effekte in Schülerlaboren? In C. Maurer (Hrsg.) *Implementation fachdidaktischer Innovation im Spiegel von Forschung und Praxis.* GDGP-Jahrestagung Zürich 2016. (S. 516-518). Universität Regensburg.
- Reimann, M., Herzog, S., Parchmann, I. & Schwarzer, S. (2020). Wirksamkeit der schulischen Vor- und Nachbereitung eines Schülerlaborbesuchs. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 26, 227-240.
- Richter, C., Sajons, C., Gorr, C., Michelsen, C. & Komorek, M. (2018). Vernetzung außerschulischer GINT-Lernorte. In C. Maurer (Hrsg.), *Qualitätvoller Chemie - und Physikunterricht - normative und empirische Dimensionen GDGP-Jahrestagung Regensburg 2017* (S. 648-651). Universität Regensburg.
- Sajons, C. & Komorek, M. (2020). Complementary networking of out-of-school learning

- environments. In O. Levrini & G. Tasquier (Eds.), *Electronic Proceedings of the ESERA 2019 Conference. The beauty and pleasure of understanding: engaging with contemporary challenges through science education, Part 9* (coed. J. Dillon & A. Zeyer) (pp. 1072-1078). Bologna: Alma Mater Studiorum – University of Bologna.
- Thomas, S. (2019). *Ethnografie. Eine Einführung*. Wiesbaden: Springer VS.
- Tischer, J. (2020). *Schülerkognitionen in einer komplementär vernetzten außerschulischen Lernumgebung – Die Projektwoche ‚Herausforderung Leben im Klimawandel‘*. Masterarbeit. Oldenburg: Universität Oldenburg.
- Tischer, J. & Komorek, M. (angenommen). *Außerschulischer und schulische Lernangebote komplementär vernetzt – Multidisziplinärer Zugang zu komplexen Herausforderungen*. In A. Wenzel & T. Schmäing (Hrsg.) *Außerschulisches Lernen in der naturwissenschaftlichen Bildung – Eine multiperspektivische Betrachtung*. Springer Nature.

Laserphysik im Lehr-Lern-Labor: Wie Lernumgebung und Disposition die intrinsische Motivation beeinflussen

Roman Kuhr (geb. Gruchow)*, Heidi Reinholz*, Lukas Maczewsky*

*Universität Rostock, Institut für Physik
roman.kuhr@uni-rostock.de

Kurzfassung

Der Beitrag untersucht, inwiefern personenspezifische Merkmale und die Gestaltung der Lernumgebung eines Projekttags zur Laserphysik im Lehr-Lern-Labor die intrinsische Motivation von Schüler:innen beeinflussen. Im Rahmen eines Prä-Post-Designs (n=44) wurden Persönlichkeitsmerkmale (BFI-10), Denktypen (nach Wellberg) und motivationale Ausgangslagen (SMQ-II, gekürzt) erfasst. Nach dem Besuch des Lehr-Lern-Labors erfolgte eine Erhebung der erlebten intrinsischen Motivation mittels der KIM-Kurskala sowie der wahrgenommenen Merkmale der Lernumgebung. Die Ergebnisse zeigen Zusammenhänge zwischen intrinsischer Motivation und extravertierten bzw. empathisierenden Persönlichkeitsmerkmalen sowie mit dem Interesse an Physik. Darüber hinaus erwiesen sich Aspekte der Lernumgebung – insbesondere eigenständiges Experimentieren, die Qualität der Betreuung und das Lernsetting vor Ort – als bedeutsame Prädiktoren. Der Beitrag diskutiert die Befunde vor dem Hintergrund aktueller motivationspsychologischer Theorien nach Rheinberg, Deci & Ryan [1], [2] und leitet Implikationen für die Gestaltung motivierender außerschulischer Lernformate ab.

1. Theoretischer Hintergrund

Die Förderung von Motivation stellt eine zentrale Herausforderung im Physikunterricht dar – insbesondere vor dem Hintergrund häufig dokumentierter Motivationsverluste in der Sekundarstufe [3]. Außerschulische Lernformate wie Lehr-Lern-Labore gelten in diesem Zusammenhang als vielversprechende Ergänzung zum schulischen Unterricht. Sie ermöglichen authentische, experimentell geprägte Lernsituationen und bieten Schüler:innen die Gelegenheit, Physik als sinnstiftend, relevant und selbstwirksam erlebbar zu machen [4], [5], [6]. Gleichzeitig zeigen Studien, dass die motivationalen Effekte solcher Lerngelegenheiten nicht pauschal vorausgesetzt werden können, sondern von einer Vielzahl situativer und personaler Bedingungen abhängen [7], [8].

Vor diesem Hintergrund untersucht der vorliegende Beitrag, inwiefern sowohl Merkmale der Lernumgebung als auch individuelle Personenmerkmale die intrinsische Motivation von Schüler:innen während eines Projekttags zur Laserphysik beeinflussen. Die Evaluation fand im Rahmen des „LaserLab“-Formats am Lehr-Lern-Labor PhySch der Universität Rostock statt, das von Lehramtsstudierenden konzipiert und durchgeführt wurde. Thematisch standen dabei Grundlagen der Laserphysik im Fokus – etwa Wellenoptik, Licht-Materie-Wechselwirkung und Anwendungen wie das Michelson-Interferometer. Der Projekttag verfolgte das Ziel, physikalisches Fachwissen mit selbstbestimmtem Experimentieren und Einblicken in den Hochschulkontext zu verbinden.

Theoretisch ist die Untersuchung im Grundmodell der Motivationspsychologie nach Rheinberg [1] sowie in der Selbstbestimmungstheorie von Deci und Ryan [2] verankert. Beide Modelle gehen davon aus,

dass intrinsische Motivation insbesondere dann entsteht, wenn Lernende die Möglichkeit zur Selbstbestimmung (Autonomie), zur Kompetenzentwicklung und zur sozialen Eingebundenheit erleben. Diese psychologischen Grundbedürfnisse gelten als universelle Voraussetzungen für nachhaltiges, engagiertes Lernen – auch im MINT-Bereich [9].

Zugleich ist bekannt, dass die motivationalen Wirkungen einer Lernumgebung stark durch individuelle Faktoren modifiziert werden können. Dazu zählen unter anderem Persönlichkeitsmerkmale (z. B. Extraversion, Neurotizismus), kognitive Stile (z. B. empathisierende vs. systematisierende Denktypen [10]) oder bestehende Interessen und Selbstwirksamkeitserwartungen in Bezug auf naturwissenschaftliche Fächer [11]. Entsprechend gewinnt die Frage an Bedeutung, welche Lernenden besonders von innovativen Lernumgebungen wie Schülerlaboren profitieren – und unter welchen Bedingungen diese ihr motivierendes Potenzial entfalten.

Ziel der vorliegenden Studie ist es, empirisch zu überprüfen, wie sich diese personalen und situativen Merkmale auf die erlebte intrinsische Motivation im LaserLab auswirken. Dabei soll aufgezeigt werden, welche Kombinationen von Faktoren besonders lernförderlich sind – mit dem Ziel, die Gestaltung zukünftiger außerschulischer Lernangebote theoriegeleitet weiterzuentwickeln.

2. Methodik

Ziel der vorliegenden Untersuchung war es, zu analysieren, inwiefern die intrinsische Motivation von Schüler:innen im Kontext eines außerschulischen Lernangebots durch personale Merkmale sowie durch

die wahrgenommenen Eigenschaften der Lernumgebung beeinflusst wird. Daraus ergeben sich zwei zentrale Forschungsfragen:

1. In welchem Ausmaß beeinflussen individuelle Personenmerkmale – etwa Persönlichkeit, Denkstil und naturwissenschaftliches Interesse – die erlebte intrinsische Motivation im Schülerlabor?
2. Welche spezifischen Merkmale der Lernumgebung im LaserLab werden als motivationsförderlich erlebt?

Zur Beantwortung dieser Fragen wurde ein quantitatives Prä-Post-Design mit standardisierten Fragebögen eingesetzt. Die Datenerhebung erfolgte im Rahmen eines ganztägigen Projekttags zur Laserphysik im Lehr-Lern-Labor PhySch an der Universität Rostock. Die Stichprobe umfasste insgesamt $n=44$ Schüler:innen der gymnasialen Oberstufe (Jahrgangsstufen 11 und 12) aus fünf Schulklassen.

Die Erhebung der Personenmerkmale erfolgte vor dem Besuch des Schülerlabors (Prä-Messung) und umfasste:

- eine gekürzte Version des Science Motivation Questionnaire II [11] zur Erfassung von intrinsischer Motivation, Selbstbestimmung, Selbstwirksamkeit, Karrieremotivation und Notenorientierung,
- eine Kurzskala zu empathisierenden und systematisierenden Denktypen nach Wellberg [10],
- sowie das etablierte BFI-10 [12] zur Erfassung der Big-Five-Persönlichkeitsdimensionen.

Nach Abschluss des Projekttags (Post-Messung) wurden mit dem KIM-Instrument [13] zentrale Aspekte des motivationalen Erlebens im Schülerlabor erfasst. Ergänzend wurden eigene Items zum inhaltlichen Verständnis, zum wahrgenommenen Studieninteresse, sowie zur Bewertung der Lernumgebung eingesetzt (z. B. Einschätzungen zur Qualität der Betreuung, zur Autonomie beim Experimentieren oder zur Relevanz der Inhalte).

Die Auswertung fokussiert auf Zusammenhänge zwischen den erfassten Personenmerkmalen, der Bewertung der Lernumgebung und der im KIM gemessenen intrinsischen Motivation.

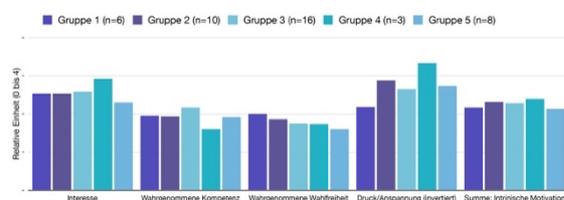


Abb. 1: Intrinsische Motivation mit Subskalen über die 5 teilnehmende Gruppen

3. Ergebnisse

Die statistische Auswertung konzentrierte sich auf Zusammenhänge zwischen der nach dem Projekttag erhobenen intrinsischen Motivation (gemessen mit

der KIM-Kurskala) und verschiedenen personalen sowie situativen Einflussfaktoren. Dabei wurden bivariate Korrelationen analysiert und ab einem Betrag von $|r| \geq 0,30$ als bedeutsam berücksichtigt (Signifikanzniveau $\alpha = .05$, kritischer t-Wert ≈ 2.06 bei $n = 27$).

3.1. Personenmerkmale

Von den untersuchten Personenmerkmalen zeigten insbesondere drei Variablen signifikante Zusammenhänge mit der erlebten intrinsischen Motivation im Schülerlabor:

- Extraversion ($r = .37$, $t = 1.98$) korrelierte positiv mit der intrinsischen Motivation,
- ebenso ein empathisierender Denkstil ($r = .43$, $t = 2.41$),
- während Neurotizismus negativ mit der intrinsischen Motivation zusammenhing ($r = -.40$, $t = -2.17$).

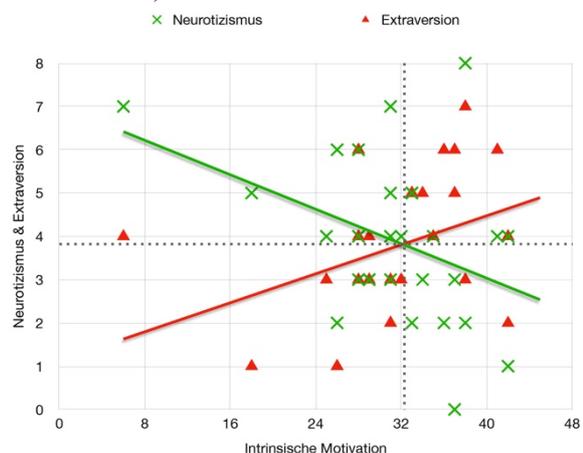


Abb. 2: Darstellung der intrinsischen Motivation in Abhängigkeit von Neurotizismus und Extraversion

Auch das Interesse am Fach Physik zeigte einen starken positiven Zusammenhang mit der Motivationserhebung im Anschluss an das LaserLab ($r = .65$, $t = 4.29$). Dagegen konnten keine relevanten Korrelationen mit dem systematisierenden Denkstil, weiteren Big-Five-Dimensionen (z. B. Offenheit, Gewissenhaftigkeit) oder der Schulnote in Physik festgestellt werden. Auch die Subskalen des SMQ-II (z. B. Karrieremotivation, Selbstwirksamkeit) wiesen keinen signifikanten Zusammenhang mit der im Labor erlebten Motivation auf.

3.2. Merkmale der Lernumgebung

Stärkere Zusammenhänge ergaben sich für mehrere Merkmale der Lernumgebung. Besonders relevant für die erlebte intrinsische Motivation waren:

- Eigenständiges Experimentieren ($r = .55$, $t = 3.30$),
- qualitativ wahrgenommene Betreuung durch Studierende ($r = .55$, $t = 3.27$),
- sowie die allgemeine Gestaltung der Lernumgebung ($r = .53$, $t = 3.11$).

Weitere signifikante Effekte zeigten sich für:

- Demonstrationsexperimente ($r = .46$, $t = 2.62$),
- die erlernten Inhalte ($r = .42$, $t = 2.34$),
- das wahrgenommene Verständnis physikalischer Konzepte ($r = .51$, $t = 2.96$),
- sowie der Eindruck vom Institut selbst ($r = .36$, $t = 1.96$).

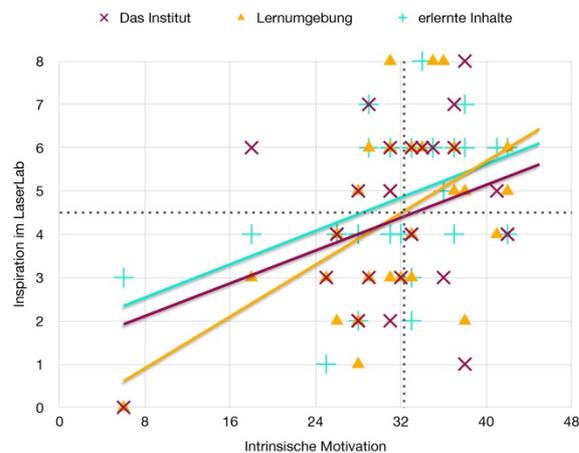


Abb. 3: Darstellung der intrinsischen Motivation in Abhängigkeit von Lernumgebung, Lerninhalten und Lernort

Demgegenüber blieben andere häufig genannte Aspekte wie Labore, Rechenaufgaben oder off-topic Konversationen statistisch unbedeutend – obwohl sie im qualitativen Feedback teilweise als interessant oder relevant benannt wurden. Dies verweist auf eine Diskrepanz zwischen subjektivem Erleben einzelner Stationen und deren tatsächlichem Einfluss auf motivationale Prozesse.

3.3. Zusammenfassung

Die Daten legen nahe, dass insbesondere Aspekte des selbstbestimmten und sozial eingebundenen Lernens im Schülerlabor – etwa eigenständiges Experimentieren oder die Interaktion mit Studierenden – eine zentrale Rolle für das motivationale Erleben spielen. Auf Seite der Personenmerkmale scheint vor allem ein offener, kontaktorientierter Zugang zur Physik (hohes Fachinteresse, Extraversion, empathischer Denkstil) mit höherer intrinsischer Motivation einherzugehen. Hingegen scheinen leistungsbezogene Orientierungen (z. B. Noten- oder Karrieremotivation) und klassische soziodemografische Variablen kaum eine Rolle zu spielen.

4. Diskussion

Die Ergebnisse der vorliegenden Studie verdeutlichen, dass sowohl personale als auch kontextuelle Faktoren zur Erklärung intrinsischer Motivation im außerschulischen Lernsetting LaserLab beitragen. Besonders stark motivierend wirkten dabei Aspekte, die im Sinne der Selbstbestimmungstheorie (Deci & Ryan, 2008) Autonomie, soziale Eingebundenheit und Kompetenz fördern: eigenständiges Experimentieren, eine unterstützende Betreuung durch Studie-

rende sowie die als authentisch erlebte Lernumgebung. Diese Befunde stützen frühere Forschungsergebnisse zu den Potenzialen außerschulischer Lernorte (Pawek, 2009; Zehren, 2009; Simon, 2019) und unterstreichen die Bedeutung didaktisch gestalteter Erfahrungsräume für die Förderung von Motivation in der Physik.

Zugleich zeigen die Daten, dass bestimmte Persönlichkeitsdimensionen – insbesondere Extraversion, ein empathisierender Denkstil sowie ein hohes physikbezogenes Interesse – mit einer erhöhten intrinsischen Motivation im Schülerlabor einhergehen. Der Zusammenhang mit Neurotizismus ist dagegen negativ. Die Ursachen dieser Korrelationen lassen sich auf Basis der vorliegenden Daten jedoch nicht eindeutig klären. Es ist denkbar, dass extravertierte und empathisch eingestellte Lernende die soziale Interaktion mit den Betreuenden intensiver wahrnehmen und stärker als emotional bedeutsam erleben, was wiederum motivationale Prozesse begünstigt. Ebenso könnte ein ausgeprägteres Interesse am Fach Physik zu einem selektiveren Fokus auf relevante Inhalte und zu einem positiveren Erleben beitragen.

Allerdings ist auch zu berücksichtigen, dass alternative Erklärungen – etwa versteckte Drittvariablen wie das schulische Vorwissen, frühere positive Erfahrungen mit außerschulischen Lernformaten oder die spezifische Klassendynamik – nicht ausgeschlossen werden können. So könnte etwa die Korrelation zwischen Neurotizismus und Motivation auch durch eine erhöhte Unsicherheit oder Prüfungsangst vermittelt sein, ohne dass dies im aktuellen Design explizit erfasst wurde.

Für die weitere Forschung ergibt sich daraus die Notwendigkeit, differenziertere Designs mit größeren Stichproben zu realisieren, um vermittelnde Variablen zu identifizieren und Wirkmechanismen kausal zu überprüfen. Insbesondere Längsschnittuntersuchungen könnten aufzeigen, ob sich motivationale Effekte über den Besuch eines Schülerlabors hinaus stabilisieren lassen oder ob es sich um situationsspezifische Phänomene handelt. Ergänzend wäre eine systematische qualitative Erhebung (z. B. durch leitfadengestützte Interviews) sinnvoll, um subjektive Perspektiven der Lernenden auf ihre Motivationserfahrungen tiefergehend zu verstehen.

In der physikdidaktischen Praxis sollten außerschulische Lernangebote wie das LaserLab nicht nur auf fachliche Inhalte, sondern gezielt auf motivational relevante Rahmenbedingungen ausgerichtet werden – insbesondere durch die Förderung eigenständigen Experimentierens, niedrigschwelliger sozialer Interaktion und eines kompetenzorientierten Feedbacks.

5. Literatur

- [1] RHEINBERG, FALKO; VOLLMMEYER, REGINA: Motivation. 9., erweiterte und überarbeitete Auflage. Stuttgart: W. Kohlhammer, 2018. – ISBN 978-3-17-032954-6.

- [2] DECI, EDWARD L. ; RYAN, RICHARD M.: Self-Determination Theory: A Macrotheory of Human Motivation, Development, and Health. In: *Canadian Psychology*, Bd. 49 (2008), Nr. 3, S. 182–185
- [3] PRENZEL, MANFRED; SCHIEPE-TISKA, ANJA; RÖNNEBECK, SILKE: Naturwissenschaftliche Kompetenz in PISA 2012: Ergebnisse und Herausforderungen. In: PRENZEL, Manfred; SÄLZER, Christine; KLIEME, Eckhard; KÖLLER, Olaf (Hrsg.): *PISA 2012: Fortschritte und Herausforderungen in Deutschland*. Münster: Waxmann, 2013, S. 189–216. – ISBN 978-3-8309-8001-8
- [4] EULER, MANFRED: Schülerlabore: Lernen durch Forschen und Entwickeln. In: Kircher, Ernst; Girwidz, Raimund; Häußler, Peter (Hrsg.): *Physikdidaktik – Theorie und Praxis*. Springer, Berlin Heidelberg, 2009, S. 799–818. – ISBN 978-3-642-41744-3. DOI: 10.1007/978-3-642-41745-0_26.
- [5] ZEHREN, WALTER: *Forschendes Experimentieren im Schülerlabor*. Dissertation, Universität des Saarlandes, Saarbrücken, 2009. DOI: 10.22028/D291-22595.
- [6] MOKHONKO, SVITLANA; NICKOLAUS, REINHOLD; WINDAUS, ANNE: Förderung von Mädchen in den Naturwissenschaften: Schülerlabore und ihre Effekte. In: *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 20 (2014), Nr. 1, S. 143–159. DOI: 10.1007/s40573-014-0016-2.
- [7] ITZECH-GREULICH, HEIKE: *Schülerlabore für die MINT-Bildung – Bestand und Perspektiven. In: Implementation fachdidaktischer Innovation im Spiegel von Forschung und Praxis*, 2015.
- [8] RIESE, JOSEF; REINHOLD, PETER: Fachbezogene Kompetenzmessung und Kompetenzentwicklung bei Lehramtsstudierenden der Physik im Vergleich verschiedener Studiengänge. In: *Lehrerbildung auf dem Prüfstand*, 2 (2009), Nr. 1, S. 104–125. DOI: 10.25656/01:14694.
- [9] NIEPEL, CHRISTOPH; BRUNNER, MARTIN; PRECKEL, FRANZIS: The Longitudinal Interplay of Students' Academic Self-Concepts and Achievements Within and Across Domains: Replicating and Extending the Reciprocal Internal/External Frame of Reference Model. In: *Journal of Educational Psychology*, 106 (2014), Nr. 4, S. 1170–1191. DOI: 10.1037/a0036307.
- [10] WELBERG, JULIA; LAUMANN, DANIEL; HEINICKE, SUSANNE: Empathisierendes oder systematisierendes Denken im Physikunterricht? Testentwicklung für Lernende der Sekundarstufe I. In: *PhyDid B – Didaktik der Physik – Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*, 2022.
- [11] GLYNN, SHAWN M. et al.: Science Motivation Questionnaire II: Validation With Science Majors and Nonscience Majors. In: *Journal of Research in Science Teaching*, 48 (2011), Nr. 10, S. 1159–1176
- [12] RAMMSTEDT, BEATRICE; JOHN, OLIVER P.: Kurzversion des Big Five Inventory (BFI-K): Entwicklung und Validierung eines ökonomischen Inventars zur Erfassung der fünf Faktoren der Persönlichkeit. In: *Diagnostica*, 51 (2005), Nr. 4, S. 195–206. DOI: 10.1026/0012-1924.51.4.195.
- [13] WILDE, MATTHIAS ; BÄTZ, KATRIN ; KOVALEVA, ANASTASSIYA ; URHAHNE, DETLEF: Überprüfung einer Kurzsкала intrinsischer Motivation (KIM). In: *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften, Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*.

Lesson Study plus

- Potentiale und Herausforderungen -

Christiane Richter*, Kai Bliesmer*, Michael Komorek*

*Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Institut für Physik, Carl-von-Ossietzky-Str. 9-11, 26129 Oldenburg
christiane.richter@uni-oldenburg.de

Kurzfassung

„If the teacher’s lens can be changed to seeing learning through the eyes of students, this would be an excellent beginning.“ (Hattie, 2009, S. 252). Wenn unsere Lehramtsstudierenden dahingehend geschult werden, Lernen durch die Augen von Schülerinnen und Schüler zu sehen, ist das ein guter Auftakt. Dies versuchen wir zu erreichen, indem in einem physikdidaktischen Wahlpflichtmodul im Master of Education die Methode der Lesson Study (Mewald, 2019) mit weiteren fachdidaktischen Konzepten zur Gestaltung von Lehr-Lern-Prozessen wie folgt kombiniert wird: Bei der Methode wird zur Unterrichtsplanung zunächst die Didaktische Rekonstruktion (Kattmann, Duit, Gropengießer, Komorek, 1997) eingesetzt, damit Studierende sich als erstes kritisch mit dem Fachlichen und den Lernendenvorstellungen zum Thema auseinandersetzen. Als Strukturierungshilfe für die didaktische Strukturierung werden die Lernschrittfolgen der Oser’schen Basismodelle genutzt (Oser & Patry, 1990; Krabbe, Zander & Fischer, 2015). Da sich diesbezüglich aber gezeigt hat, dass in den Lernschrittfolgen nicht klar zwischen Oberflächen- und Tiefenstruktur des Unterrichts differenziert wird, wurde die Rückwärtsplanung eingeführt, um zu gewährleisten, dass die Studierenden ihren Unterricht vom Lernprozess her rückwärts planen (Richter & Komorek, 2017). Die Lesson Study fungiert letztlich als Diagnose-Instrument für Planung und Durchführung des Unterrichts. Die so entstandene Methodenkombination bezeichnen wir als „Lesson Study plus“. Bei der Methode sind im Laufe der Jahre Potenziale, aber auch immer wieder neue Herausforderungen deutlich geworden, die hier vorgestellt werden.

1. Der Weg zur „Lesson Study Plus“

Vorge stellt wird im Folgenden ein fachdidaktischer Weg der Unterrichtsplanung, die mit der Methode der Lesson Study (Mewald, 2019) kombiniert wurden. Bei der Kombination dieser Konzepte mit der Lesson Study handelt es sich um die „Lesson Study Plus“.

1.1. Basismodelle und Rückwärtsplanung

Das Modell der Didaktischen Rekonstruktion (Duit, Kattmann, Gropengießer, Komorek & Parchmann, 2012) dient als Rahmen und fachdidaktische Grundlage für die Planung von Lehr-Lern-Prozessen im Unterricht oder im Schülerlabor. Dabei setzen sich Studierende kritisch mit den fachlichen Inhalten auseinander, beziehen dann die Ergebnisse der fachlichen Klärung, die Elementaria (Bleichroth, 1991), auf die recherchierten oder erhobenen Lernendenvorstellungen, um daraus die didaktische Strukturierung ihres Unterrichts oder Schülerlabor-Angebots herzuleiten.

Als operative Strukturierungshilfe werden die Lernschrittfolgen der Oser’schen Basismodelle genutzt (Oser & Patry, 1990; Krabbe et al., 2015). Die Lernschrittfolgen sind für die Strukturierung von Lehr-Lern-Situationen hilfreich, führen beim Einsatz durch die Studierenden allerdings dazu, dass nicht immer scharf zwischen Oberflächen- und Tiefenstruktur des Unterrichts unterschieden wird. Um diesem Problem

zu begegnen wird das Konzept der Rückwärtsplanung (Richter & Komorek, 2017) eingesetzt. Es unterstützt Studierende dabei, Unterricht von den Lernprozessen der Schüler:innen und damit ausgehend von der Tiefenstruktur bis hin zur Oberflächenstruktur zu planen. Angehende Lehrkräfte sind oft nur auf die Sichtstruktur ihres Unterrichts fixiert: Welchen Einstieg, welches Experiment, welche Methoden, welche Sozialformen ist zu wählen? Die kognitive Tiefenstruktur haben sie meist nicht im Blick. In einer Matrix (Tabelle 1) werden daher die Lernschritte explizit auf Tiefen- und Oberflächenstruktur des Unterrichts bezogen (Richter & Komorek, 2017):

Tab. 1: Matrix der Rückwärtsplanung, eigene Darstellung

3 Planungsschritte →	1. Diese kognitiven Prozesse sollen bei den SuS ablaufen	2. Damit die Kognitionen stattfinden, müsse die SuS folgende Handlungen ausführen:	3. Damit 1. und 2. ablaufen, muss die Lehrkraft diese Aufgabe/ Lernumgebung bereitstellen:
Lernschritte der SuS: Beispiel für das Basismodell Begriffsbildung ↓			
Bewusstmachen des Vorwissens			
Durcharbeiten eines Prototyps			
Beschreibung der Merkmale des neuen Begriffs			
Aktiver Umgang mit dem neuen Begriffs			
Anwenden des Begriffs in anderen Kontexten			

Für den späteren Einsatz der Lesson Study ist diese Matrix relevant, da hier eine Verbindung geschaffen wird zwischen den von den Studierenden erwarteten kognitiven Prozessen der Schüler:innen und deren Handlungen im Unterricht, die durch diese Prozesse ausgelöst werden sollen.

1.2. Der reguläre Lesson Study Zyklus

Die Lesson Study ist eine Methode kollaborativer Unterrichtsforschung: Ein:e Expert:in bildet mit No:viz:innen (Studierenden) eine Lehr-Lern-Gemeinschaft mit gemeinsamer Lerntheorie. Eine Lesson Study verläuft sinnvollerweise zyklisch, man durchläuft fünf Phasen (Mewald, 2019):

- a) **Study:** Die Methode wird vorgestellt und der Forschungsschwerpunkt wird festgelegt.
- b) **Plan:** Die Unterrichtsaktion oder Lehr-Lern-Aktion im Schülerlabor wird gemeinsam geplant. Der Fokus liegt auf dem fachlichen Lernen der Schüler:innen, das effektiv gefördert werden soll. Operativ genutzt werden die Lernschrittfolgen der Basismodelle des Lernens.
- c) **Observe:** Die Beobachtung der Handlungen der Schüler:innen wird z. B. auf Kärtchen notiert. Diese bilden die wichtigste Datenquelle der Lesson Study. Jeder Studierende fokussiert sich auf eine:n Schüler:in. Im Lernaktivitätsdiagramm wird dessen Aktivität im Unterricht oder Schülerlabor gemäß der Anforderungsbereiche und des Unterrichtsgeschehens aufgetragen.
- d) **Reflect & Revision:** Rückschlüsse auf Motivation, fachliche Schülervorstellungen und Kognitionen werden gezogen. Es kann beurteilt werden, ob die Lernziele erreicht wurden und inwiefern die Planung überarbeitet werden muss.
- e) **Reteach:** Die Ergebnisse werden genutzt, um zu klären, wie der Ablauf verbessert und wo Lernen besser unterstützt werden kann

Das gemeinsame Verständnis zu einer konkreten Lerntheorie ist Grundlage jeder Lesson Study. Fokus liegt auf der Beobachtung der Lernhandlungen der Schüler:innen, um entlang der Diagnoseergebnisse Vorschläge für Verbesserung der Lehr-Lern-Situation entwickeln zu können. Die folgende Abbildung zeigt die zyklische Struktur der Lesson Study.

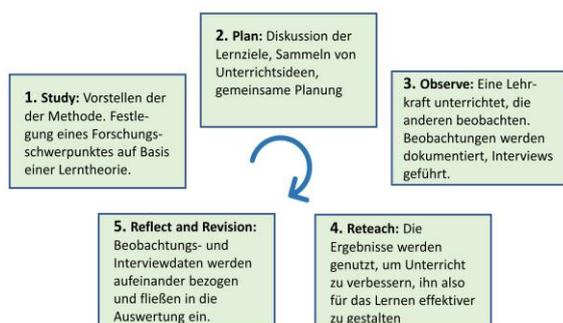


Abb. 1: Zyklischer Verlauf einer Lesson Study, eigene Darstellung in Anlehnung an Mewald (2019)

1.3. Die Erweiterung zu „Lesson Study Plus“

Die Methode der Lesson Study wurde bereits wiederholt in physikdidaktische Mastermodule integriert, in denen die Planung, Durchführung und Reflexion von Lehr-Lern-Situationen in Unterricht oder Schülerlabor im Zentrum stand. Wie bereits kurz erwähnt, haben Studierende aber oft nur die Sichtstruktur bei ihrer Unterrichtsplanung im Fokus. Um Änderungen bewirken zu können, müssen (angehende) Lehrkräfte ihren Unterricht auf Wirksamkeit hin reflektieren (Meentzen & Stadler, 2010), was die Notwendigkeit impliziert, auch die Tiefenstruktur des Unterrichtsgeschehens, also die kognitiven Prozesse der Schüler:innen, in den Blick zu nehmen. Damit Oberflächen- und Tiefenstruktur von Lehr-Lern-Situationen durch die Studierenden besser erfasst werden können, wurde die Lesson Study erweitert, indem sie mit dem Konzept der Rückwärtsplanung (Richter & Komorek, 2017) kombiniert wurde – entstanden ist die „Lesson Study Plus“. Die Kombination von Lesson Study und Rückwärtsplanung zur „Lesson Study Plus“ eignet sich sehr gut, weil auf der Oberflächenstruktur zunächst die bei der Rückwärtsplanung beschriebenen zu erwartenden Lernhandlungen mit den beobachteten Lernhandlungen verglichen werden können. Daraus können sodann auf der Tiefenstruktur Schlüsse hinsichtlich der abgelaufenen Lernprozesse gezogen werden, die dann wiederum mit den erwarteten Lernprozessen verglichen werden. Man vollzieht also den in der Lesson Study angelegten Vergleich zwischen erwarteten und tatsächlich abgelaufenen Prozessen durch den Einsatz der Rückwärtsplanung auf zwei Ebenen: Oberflächen- und Tiefenstruktur. Durch den Einsatz der Lesson Study allein würde dieser Vergleich erfahrungsgemäß nur auf der Oberflächenebene stattfinden.

Die neue Methode wurde in ein physikdidaktisches Pflichtmodul am Ende des Masterstudiums integriert, in dem nach den Schulpraktika und vor dem Referendariat ein letztes Mal Unterricht geplant, durchgeführt und reflektiert wird. In den Unterricht an der Schule ist auch der Besuch von Schüler:innen an einem außerschulischen Lernort und einem Lehr-Lern-Labor an der Universität vorgesehen (Format SchAUplus). Das Modulkonzept wurde im Rahmen der Qualitäts-offensive Lehrerbildung OLE+ entwickelt. Das Modul wird entlang der fünf Phasen der Lesson Study strukturiert: Es beginnt mit der Vorstellung der Methode, der Besprechung der grundlegenden theoretischen Lerntheorien und der Festlegung eines Forschungsschwerpunktes (Study). Die Planungsphase (Plan) beinhaltet die gemeinsame Planung des Unterrichts unter Einbeziehung eines Besuchs eines außerschulischen Lernorts und eines Lehr-Lern-Labors. Eine angehende Lehrkraft führt anschließend den Unterricht durch, die anderen beteiligten Studierenden beobachten sog. „Case Pupil“ – das sind Schüler:innen unterschiedlicher Leistungsniveaus, die im Vorfeld bestimmt wurden und dazu dienen, dass sich die Studierenden auf wenige Personen fokussieren kön-

nen. Die Beobachtungen der Lernhandlungen der Schüler:innen werden narrativ offen auf kleine Kärtchen geschrieben und auf einer Zeitleiste gegen die eingeschätzte Lernaktivität aufgetragen, sodass sich eine Lernaktivitätskurve ergibt. Daraus werden Rückschlüsse auf Motivation, Vorstellungen, Verständnis etc. des Schülers bzw. der Schülerin gezogen. Hierbei müssen die Studierenden erkennen, dass Beobachtungen zu idiosynkratischen, also zu sehr persönlichen Eindrücken führen: Beobachtende nutzen individuelles Wissen bei der Dokumentation (Observe). Um Eindrücke neutraler bewerten zu können, muss dies bewusst sein. Aus diesem Grund werden alle Beobachtungsdaten im Anschluss (Reflect and Revision) zusammengefasst und zur Interpretation etwaiger Lernprobleme aufseiten der Schüler:innen herangezogen (Mewald, 2019), hinzu kommen noch die Informationen aus den nachgängigen Interviews und die Eindrücke der Fachlehrkraft. Die Erkenntnisse werden schließlich genutzt, um den Unterricht weiterzuentwickeln; mit dem Ziel die beobachteten Schüler:innen (Reteach) zu fördern. Zur positiven Wirksamkeit der Lesson Study wird auf das Review von Rzejak (2019) verwiesen.

2. Potenziale

In der Ausbildung angehender Lehrkräfte, ist es überaus wichtig, deren Reflexionskompetenz zu fördern (Kohlmeier 2016). Die Lesson Study in Kombination mit der Rückwärtsplanung (Lesson Study plus) geben Studierenden die Gelegenheit, die Strukturierung ihres Unterrichts oder Schülerlabor-Angebots zu überdenken. Sie überarbeiten die Klarheit der Aufgabenstellung und können dadurch gezielt ihre Unterrichtsplanung dahingehend ändern, Schüler:innen zu fördern und zu fordern. Selbst zu beobachten, wie Schüler:innen auf ihr Lehrhandeln reagieren, ist und war für die Studierenden ein Augenöffner! Sie können nachvollziehen, dass sie oft noch über transmissive Vorstellungen vom Lehren verfügen, wonach Wissen von der Lehrkraft an die Schüler:innen übergeben werden könnte, und dass dieses Vorgehen nicht gut funktioniert. Das wiederum führt zur Erweiterung ihres Methodenreservoirs, insbesondere zur intensiveren Nutzung kooperativer Lernformen, die das forschende Lernen unterstützen. Die Erkenntnis, dass Kontexte mit Lebensweltbezug die Schüler:innen zur Aktivität und zu bestimmten fachbezogenen Kognitionen anregen, wirkt ebenfalls sehr positiv.

3. Herausforderungen

Der Perspektivwechsel vom Lehren zum Lernen zeigt den Charme der Lesson Study, der auch in der „Lesson Study Plus“ erhalten bleibt. Obwohl die Unterscheidung zwischen Oberflächen- und Tiefenstruktur durch die Einbindung der Rückwärtsplanung verbessert wurde, ist für die Studierenden die Tiefenstruktur immer noch schwierig abzuleiten. Der Fokus wird immer noch zu stark auf die Sichtstruktur des Unterrichts, auf die zu beobachtende Lernhandlungen

gelegt. Die Lesson Study beeinflusst also die Bestrebungen der Rückwärtsplanung, auch die Tiefenstruktur zu fokussieren negativ, und unterstützt ungewollt die starke Konzentration der Studierenden auf Handlungen. Diesen ungewollten Fokus kritisiert auch Knoblauch (vgl. Knoblauch, 2019, S. 49), als er konstatiert, dass Interpretationen der Beobachtungen und zugrundeliegende Lerntheorien leider nicht oder unzureichend erläutert werden. Eine Klärung des Zusammenhangs zwischen Lernverständnis, Beobachtungsmethoden, Datensammlung und Interpretation ist jedoch unerlässlich (Larssen et al., 2018).

Eine weitere Schwierigkeit der Methode ist die Skalierung der Lernaktivität, die bei Knoblauch (2019) in Reproduktion, Reorganisation und Transfer untergliedert ist. Unserer Meinung nach gibt diese Einteilung der Lernaktivität die tatsächliche Lernaktivität der Schüler:innen nicht gut wieder und verschleiert den Blick auf die Tiefenstruktur der Lehr-Lern-Situation.

4. Lösungsansätze

Es muss gelingen, die „Lesson Study Plus“ noch weiter zu verbessern und so anzupassen, dass sie im Hinblick auf die gewünschte Professionalisierung der Lehramtsstudierenden erlaubt, Oberflächen- und Tiefenstruktur des Unterrichts explizit zu unterscheiden.

Fakt ist, dass nur die Oberflächenstruktur des Lernens direkt beobachtet werden kann, die Tiefenstruktur nicht. Die Oberflächenstruktur basiert auf Veränderung des gegenwärtigen Verhaltens (vgl. Knoblauch, 2019, S. 51). Sichtbar sind Aktivitäten, Gestik, Blickrichtung, Kontext und soziale Beziehungen. Der Beobachter ist angewiesen auf „wahrnehmendes Beobachten“ (Knoblauch, 2019, S. 52). Um herauszufinden, was eine Person denkt, fühlt oder wahrnimmt, bedarf es einiger Umwege (Schäfer, 2012).

Ein möglicher Brückenschlag zwischen Oberflächen- und Tiefenstruktur bietet die Erkenntnis, dass die Komplexität der Lernhandlungen Rückschlüsse auf die Komplexität der kognitiven Prozesse in der beobachteten Situation erlaubt, sodass in der „Lesson Study Plus“ diese Verbindung stärker in den Blick genommen werden muss. Hierzu wurde ein Beobachtungsverfahren entwickelt, das die Verfahren von drei Autoren (de Boer, 2012; Dudley, 2014; Knoblauch, 2016), die das Konzept der Lesson Study einsetzen, miteinander kombiniert. Als Ergebnis resultiert folgender Ablauf für die verbesserte „Lesson Study Plus“:

- a) Bei der Lesson Study wird der Unterricht entlang einer Rückwärtsplanung entwickelt, die auf Basismodellen und Lernschrittfolgen basiert
- b) Es werden „Case Pupil“ unterschiedlicher Leistungsstufen durch die Lehrkraft gewählt.
- c) Grundlage der Lernaktivitätskurve sind Beobachtungen, die narrativ auf Karten notiert werden, sowie Interviews mit den Case Pupil.

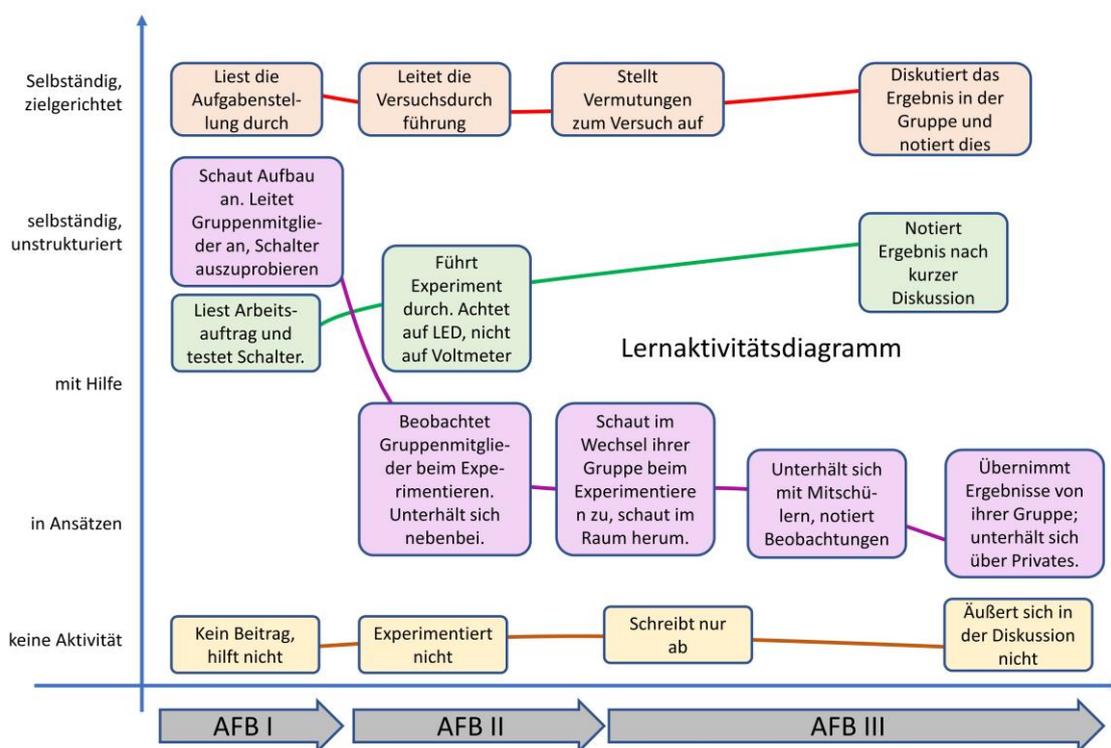


Abb. 2: Angepasste Lernaktivitätskurve, eigene Darstellung. Jede Farbe entspricht einem Lernenden.

- d) Die Erkenntnisse werden mit den, während Rückwärtsplanung festgesetzten anzustrebenden Kognitionen verglichen, um die Tiefenstruktur abzuleiten (neu!).
- e) Darauf basierend wird der Unterricht weiterentwickelt.

Insbesondere der vierte Aspekt ist bedeutsam, weil hier eine explizite Unterscheidung zwischen Oberflächen- und Tiefenstruktur vorgenommen wird. Daraus wird ersichtlich, dass vor allem die Lernaktivitätskurve überarbeitet werden muss, denn diese fungiert durch die Darstellung von Lernhandlungen als Attraktor für das Denken auf Oberflächenstrukturebene. Man muss sich bewusst machen, dass die Lernaktivität im Prinzip die Sichtstruktur des Lernens darstellt. Insofern ist es schlüssig, dass von der Komplexität der Lernaktivitäten Rückschlüsse auf die Komplexität der kognitiven Prozesse in der beobachteten Situation erfolgen müssen. Wenn innere Verarbeitungsprozesse sich in äußere Handlungen verwandeln, verändern sie sich (vgl. Knoblauch, 2019, S. 73). Eine Lernaktivitätskurve (Abbildung 2) soll diesen Zusammenhang grafisch darstellen.

Die Skalierung der Lernaktivitätskurven wurde angepasst: Für die Aktivitäten wird der Anforderungsbereich (I bis III) für jede Aufgabenstellung bestimmt und dann von „keine Aktivität“ bis zu „selbständig und zielgerichtet aktiv“ skaliert. Damit gelingt es besser, von der (beobachteten) Oberflächenstruktur auf die Tiefenstruktur des Unterrichts bzw. des Laborangebots zu schließen.

5. Erfahrungen und Fazit

Die „Lesson Study Plus“ wurde im Sommersemester 2023 erstmals mithilfe der neuen Auswertekriterien durchgeführt. Erfahrungen auf der Ebene der Studierenden sind positiv zu werten. Die neue Kombination aus Rückwärtsplanung und Lesson Study erweist sich als ergiebig, dahingehend, da nun der direkte Vergleich von Planung und Beobachtung möglich wird, – auf Sichtstruktur- und auf Tiefenstrukturebene. So können Schwachstellen aufgedeckt und angegangen werden. Zu beobachten, wie Schüler:innen auf das eigene Lehrerhandeln reagieren, und dies auf die eigene Planung zu beziehen, war für Studierende ein weiterer Schritt in Richtung Reflexionskompetenz, den eigenen Unterricht auf Wirksamkeit zu überprüfen.

Die Verdeutlichung der Tiefenstruktur des Unterrichts hatte ebenfalls positive Effekte auf die Förderung der beobachteten Schüler:innen, wie am Fallbeispiel des Case Pupil Melanie besonders deutlich wird: Melanie wird von der Fachlehrkraft als schwach und ruhig eingestuft. Sie wurde im Rahmen der Lesson Study von zwei Studierenden (B1, B2) beobachtet. B1 hat Zwischenfragen in Arbeitsphasen gestellt, B2 hat Melanie anschließend interviewt. Auf der Ebene der Oberflächenstruktur stellt sich Melanie als sehr still dar, sie guckt häufig zum Nachbarn, gibt Antworten nur auf Ansprache, sie wirkt teilnahmslos. Untersuchungen auf der Tiefenstruktur zeichnen von Melanie ein vollständig anderes Bild: Die Interviews zeigen, dass sie genau weiß, worum es in der Stunde geht. Melanie schreibt nicht ab, sondern vergewissert sich durch Blick auf ihre Nachbarin, ob ihr Ergebnis

richtig ist. Sie ist lediglich verunsichert. Für die Lehrkraft war das eine neue Sichtweise, da sie auf die Unsicherheiten Melanies nun gezielt eingehen kann.

6. Literatur

- De Boer, H. (2012). Pädagogische Beobachtung. In H. de Boer & S. Reh (Hrsg.), *Beobachtung in der Schule – Beobachten lernen*. (S. 65-82). Springer.
- Duit, R., Gropengießer, H., Kattmann, U., Komorek, M. & Parchmann, I. (2012). The Model of Educational Reconstruction – a Framework for improving Teaching and learning Science. In: D. Jorde & J. Dillon (Hrsg.), *Science Education Research and Practice in Europe* (S. 13-37). Sense Publishers.
- Dudley, P. (2014): *Lesson Study: a Handbook*. LSUK.
- Hattie, J. (2009). *Visible Learning*. Routledge.
- Kattmann, U., Duit, R., Gropengießer, H. & Komorek, M. (1997). Das Modell der Didaktischen Rekonstruktion - Ein Rahmen für naturwissenschaftsdidaktische Forschung und Entwicklung. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, (3)3, 3-18.
- Knoblauch, R. (2017). Lesson Study. Kooperative Weiterentwicklung des Lehrens und Lernens. *Pädagogik*, 69(3), 34-39.
- Knoblauch, R. (2019). Beobachtung und Dokumentation von Lernaktivitäten in der Lesson Study. In C. Mewald & E. Rauscher (Hrsg.), *Lesson Study. Das Handbuch für kollaborative Unterrichtsentwicklung und Lernforschung* (S.49-76). StudienVerlag.
- Kohlmeyer, S. (2016). Anstöße zur Selbstreflexion im Lehramtsstudium durch themenorientierte Workshops. *Die Hochschullehre*, 2, 1-18.
- Krabbe, H., Zander, S. & Fischer, H. E. (2015). *Lernprozessorientierte Gestaltung von Physikunterricht. Materialien zur Lehrerfortbildung*. Waxmann.
- Larssen, D., Cajkler, W., Mosvold, R., Bjuland, R., Helgevold, N., Fauskanger, J., Wood, P., Baldry, F., Jakobsen, A., Bugge, H., Næsheim-Bjørkvik, G. & Norton, J. (2018). A literature review of lesson study in initial teacher education: Perspectives about learning and observation. *International Journal for Lesson and Learning Studies*, 7(1), 8-22.
- Mewald, C. (2019). Die Beobachtungen in der Lesson Study. In C. Mewald, E. Rauscher (Hrsg.), *Lesson Study. Das Handbuch für kollaborative Unterrichtsentwicklung und Lernforschung* (S. 31-48). StudienVerlag.
- Meentzen, U. & Stadler, M. (2010). Wie Lehrkräfte bei der Reflexion über ihren Unterricht unterstützt werden können. In F. H. Müller, A. Eichenberger, M. Lüders (Hrsg.) & J. Mayr (Hrsg.), *Lehrerinnen und Lehrer lernen. Konzepte und Befunde zur Lehrerfortbildung* (S. 161-173). Waxmann.
- Messner, R. (2019). „Tiefen-Didaktik“ – zur praktischen Wende der Lehr-Lernforschung. In U. Steffens & R. Messner (Hrsg.), *Unterrichtsqualität. Konzepte und Bilanzen gelingenden Lehrens und Lernens* (S. 29-56). Waxmann.
- Oser, F. & Patry, J.-L. (1990). *Choreographien unterrichtlichen Lernens: Basismodelle des Unterrichts*. Pädagogisches Institut der Universität Freiburg.
- Reusser, K., Pauli, C. & Zollinger, A. (1998). Mathematiklernen in verschiedenen Unterrichtskulturen – eine Videostudie im Anschluss an TIMSS. *Beiträge zur Lehrerbildung*, 16(3), 427-438.
- Rzejak, D. (2019). Zur Wirksamkeit von Lesson Study. Ein systematisches Review empirischer Studien. In C. Mewald & E. Rauscher, (Hrsg.), *Lesson Study. Das Handbuch für kollaborative Unterrichtsentwicklung und Lernforschung* (S. 97-112). StudienVerlag.
- Richter, C. & Komorek, M. (2017). Backbone - Rückgrat bewahren beim Planen. In S. Wernke, & K. Zierer, (Hrsg.), *Die Unterrichtsplanung: Ein in Vergessenheit geratener Kompetenzbereich?!* (S. 91-103). Verlag Julius Klinkhardt.
- Schäfer, G. E. & Alemzadeh, M. (2012). *Wahrnehmendes Beobachten. Beobachtung und Dokumentation am Beispiel der Lernwerkstatt Natur*. Verlag das Netz.

Mach dein Gehirn fit für Physik

- Einfluss einer Growth Mindset Lerneinheit -

Laura Goldhorn*, Thomas Wilhelm*, Verena Spatz⁺

*Institut für Didaktik der Physik, Goethe-Universität Frankfurt am Main, Max-von-Laue-Str. 1, 60438 Frankfurt

⁺Didaktik der Physik, TU Darmstadt, Hochschulstraße 12, 64289 Darmstadt

goldhorn@physik.uni-frankfurt.de

Kurzfassung

Mehrere unabhängige, internationale Studien zeigen, dass Schüler*innen mit einem (fachbezogenen) Growth Mindset einen besseren Umgang mit herausfordernden Lernsituationen haben, unabhängig von ihrem tatsächlichen Könnens- und Wissensstand. Unsere eigenen Erhebungen zeigen, dass sich Schüler*innen zu Beginn des Physikunterrichts in der 7. Jahrgangsstufe überwiegend dem Growth Mindset zuordnen lassen, doch schon im ersten Lernjahr verändert sich diese Verteilung: immer mehr Schüler*innen sind von einer notwendigen Physik-Begabung überzeugt und vertreten somit ein physikbezogenes Fixed Mindset. Die Lerneinheit "Mach dein Gehirn fit für Physik" ist als fachbezogene Mindset-Intervention entwickelt worden, um diesem Mindset-Shift entgegenzuwirken. Angelehnt an die allgemeinen Mindset-Interventionen nach Yeager und Dweck und mit der Einübung einer Lernstrategie an das Fach Physik geknüpft, kann die Lerneinheit curriculumsunabhängig in der Sekundarstufe 1 eingesetzt werden. In einer ersten Studie im Pre-Post-Design wurde die Lerneinheit mit 14 Lerngruppen durchgeführt und die Wirkung der Intervention auf das physikbezogene Mindset der teilnehmenden Schüler*innen untersucht.

1. Einleitung

Nach der Mindset-Theorie von Dweck lassen sich individuelle Überzeugungen über Intelligenz auf einem Spektrum zwischen den zwei Polen Fixed Mindset und Growth Mindset einordnen. Welchem Mindset Personen eher zugeordnet werden können, lässt sich durch Aussagen wie „Intelligenz ist eine feste Eigenschaft, die sich nicht wirklich verändern lässt“ (Dweck, 2000) messen. Wer solchen Aussagen zustimmt, vertritt eher ein Fixed Mindset, also die Auffassung, dass Intelligenz angeboren und unveränderlich ist. Demgegenüber steht das Growth Mindset, das auf der Überzeugung basiert, dass Intelligenz entwickelbar ist und sich zu jedem Zeitpunkt durch Anstrengung und Lernen noch etwas steigern lässt (Dweck, 2000).

Das Mindset allein sagt nichts über den aktuellen Leistungsstand von Schüler*innen aus. Auch Personen mit einem Fixed Mindset können sehr erfolgreich sein. Doch im schulischen Alltag kommt es fast zwangsläufig zu Phasen, in denen Schüler*innen mit Rückschlägen oder neuen Herausforderungen konfrontiert werden. In solchen Momenten lassen sich, je nach zugrunde liegendem Mindset, unterschiedliche Handlungsmuster beobachten. Wer ein Fixed Mindset hat, interpretiert Schwierigkeiten schnell als Zeichen mangelnder Begabung und neigt dazu, aufzugeben, z. B. durch das Abwählen eines Schulfachs. Schüler*innen mit einem Growth Mindset hingegen sehen solche Situationen eher als Chance zum Lernen, suchen nach neuen Lösungsstrategien und investieren mehr Anstrengung in die Weiterentwicklung ihrer Fähigkeiten (Dweck & Yeager,

2019). Ein Growth Mindset steht also in engem Zusammenhang mit lernförderlichem Verhalten und gilt somit gerade im akademischen Bereich als besonders unterstützenswert (vgl. z. B. (Molden & Dweck, 2006; Mueller & Dweck, 1998).

2. Physikbezogenes Mindset bei Schüler*innen

Die meisten Mindset-Studien beziehen sich auf allgemeine Überzeugungen zur Intelligenz. Dennoch zeigen Forschungsergebnisse, dass diese Überzeugungen auch domänenspezifisch unterschiedlich ausgeprägt sein können (Hong et al., 1999; Yeager et al., 2013). Daher wurden bestehende Messinstrumente für das allgemeine Intelligenz-Mindset zu erheben, leicht angepasst, um beispielsweise das Mindset in Mathematik über eine fachbezogene Intelligenz („math intelligence“) oder Fähigkeit („math ability“) zu erfassen (vgl. Shively & Ryan, 2013; Sisk et al., 2018). Die Güte der so variierten Skalen wurde in den genannten Studien nicht überprüft.

Um das Mindset speziell im Fach Physik besser beschreiben und erheben zu können, wurde auf Basis qualitativer Interviewstudien (Spatz & Goldhorn, 2021) ein physikspezifischer Fragebogen entwickelt (Goldhorn et al., 2022a). Dieser kombiniert die allgemeine Intelligenzskala nach Dweck (2000) mit zwei neuen Skalen, die aus Interviews mit Schüler*innen abgeleitet wurden (Spatz & Goldhorn, 2021). Diese beziehen sich auf eine (angeborene) „Physikbegabung“ und den Einfluss von „Anstrengung in Physik“ und wurden mit einer Stichprobe von N = 256 Schüler*innen validiert (Goldhorn et al., 2020).

Erste Erhebungen mit diesem physikbezogenen Mindset-Fragebogen zeigen, dass in der 7. Jahrgangsstufe ein Growth Mindset im Fach Physik bei der Mehrheit der Schüler*innen messbar ist (vgl. Goldhorn et al., 2022a). Nur ein kleiner Anteil glaubt an eine angeborene Physikbegabung (Fixed Mindset (Physikbegabung)): 5,5 % der Mädchen und 2,6 % der Jungen. Bereits nach einem Jahr Physikunterricht hat sich dieser Anteil jedoch signifikant erhöht: In der 8. Jahrgangsstufe vertreten 16,8 % der Mädchen und 9,1 % der Jungen ein physikbezogenes Fixed Mindset. Gleichzeitig sinkt der Anteil der Schüler*innen mit einem physikbezogenen Growth Mindset von 69,1 % auf 43,5 % (Goldhorn et al., 2022a). Diese Entwicklung scheint nicht allein altersbedingt zu sein, sondern in direktem Zusammenhang mit dem Physikunterricht zu stehen. Diese Vermutung wird durch eine Folgestudie während der Corona-Pandemie gestützt, in der nach den Phasen mit geschlossenen Schulen und viel Distanzlernen eine um etwa ein Schuljahr verzögerte Veränderung der Mindsetverteilung beobachtet werden kann. Bei stark reduziertem Präsenzunterricht war der Anstieg des physikbezogenen Fixed Mindsets erst zwischen der 8. und 9. Jahrgangsstufe messbar (Goldhorn et al., 2022b).

3. Growth Mindset-Interventionen

Ein Schwerpunkt der Mindset-Forschung ist die Entwicklung wirkungsvoller Interventionen, die ein Growth Mindset fördern. Dabei sollen die Teilnehmenden von der Veränderbarkeit ihrer Fähigkeiten überzeugt werden. Zwar ist unbestritten, dass es genetisch bedingte Unterschiede in der Gehirnstruktur gibt und somit nicht alle Menschen die gleichen Startvoraussetzungen haben (Skeide et al., 2020), doch auch die Neuroplastizität des Gehirns ist wissenschaftlich gesichert. Neuroplastizität beschreibt die Fähigkeit des Gehirns, sich durch Lernprozesse zu verändern, indem neuronale Netze neu gebildet und weiterentwickelt werden. Neue Informationen führen zu neuen neuronalen Verknüpfungen, die durch Wiederholung gestärkt und effizienter abrufbar werden (Jäncke, 2014). Diese neurowissenschaftliche Grundlage ist ein Kernelement vieler Growth-Mindset-Interventionen. Das Ziel ist also, den Teilnehmenden verständlich zu machen, dass Fähigkeiten grundsätzlich entwickelbar sind – unabhängig von den individuellen Ausgangsbedingungen. Eine viel zitierte Intervention, die auch die Grundlage für viele weitere Interventionsstudien bildet, ist von Blackwell et al. (2007), bei der ein kurzer Text („You Can Grow Your Intelligence“) das Gehirn mit einem Muskel vergleicht, der durch Training stärker wird. Diese Metapher ist leicht zu merken und vermittelt das Prinzip der Neuroplastizität anschaulich.

Oft schließen Growth-Mindset-Interventionen mit einer aktiven Aufgabe zum so genannten „Saying is Believing“-Effekt ab: Die Teilnehmenden sollen ihr

neu gewonnenes Wissen an jüngere Schüler*innen weitergeben. Durch das Wiedergeben in eigenen Worten soll die Kernbotschaft verinnerlicht und die eigene Überzeugung weiter gefestigt werden (Aronson et al., 2002).

Inhaltlich gibt es also zumindest Kernelemente, die sich durch die verschiedenen (erfolgreichen) Mindset-Interventionen durchziehen. In der Länge und Art der Vermittlung ist jedoch eine große Varianz. Während die bereits erwähnte Intervention von Blackwell et al. (2007) acht Trainingseinheiten für die Intervention nutzte, sind neuere Ansätze viel kürzer und oft auch digital umgesetzt. Ein Beispiel dafür ist die nur 25-minütige Online-Intervention in der „National Study of Learning Mindsets“ (Yeager et al., 2019). Der Vorteil an kürzeren, standardisierten Interventionen ist die Skalierbarkeit. Gleichzeitig gibt es Hinweise darauf, dass längere Interventionen mit mehreren Einheiten und ausgebildeten Trainingsleiter*innen größere Effekte erzeugen, die jedoch bisher nicht in Meta-Studien bestätigt werden können (Burnette et al., 2022).

4. „Mach dein Gehirn fit für Physik“ – eine physikbezogene Growth-Mindset-Intervention

Ergänzend zum oben beschriebenen physikbezogenen Mindset-Fragebogen wurde, in Anlehnung an die Growth-Mindset-Intervention von Yeager et al. (2016) eine fachbezogene Mindset-Intervention für die Sekundarstufe I entwickelt (Goldhorn et al., 2021). Die Intervention wird im Physikunterricht durchgeführt. Die teilnehmenden Schüler*innen arbeiten selbstständig für ca. zwei Doppelstunden mit einem Lernbuch. Darin lernen sie das Konzept der Neuroplastizität kennen und erarbeiten sich mit einer darauf angepassten Lernstrategie die physikalischen Grundlagen für ein Experiment (für mehr Details zu den Inhalten und deren Umsetzung in der Lerneinheit vgl. Goldhorn et al., 2023). Teil der Lerneinheit ist ein Experiment, das im hessischen Kerncurriculum nicht verpflichtend vorgesehen ist. Daher kann die Lerneinheit zu jedem Zeitpunkt durchgeführt werden, das benötigte Vorwissen ist Teil des Materials. Es ist jedoch möglich, dass die Physiklehrkräfte den Versuch parallel zur Lerneinheit auch im Physikunterricht durchführen (lassen). Die Texte und insbesondere die Aufgabenstellungen wurden mit dem Fokus auf die 8. Jahrgangsstufe entwickelt und in dieser Altersstufe auch getestet. In anderen Jahrgangsstufen muss darauf ggf. Rücksicht genommen werden, beispielsweise werden 10. Klässler*innen voraussichtlich weniger Lesezeit für die Texte benötigen, während Schüler*innen der 7. Jahrgangsstufe möglicherweise mehr Unterstützung dabei brauchen.

Betreut wird die Growth-Mindset-Intervention von den Physiklehrkräften. Das Material ist dabei so gestaltet, dass die Schüler*innen es selbstständig in eigenem Tempo bearbeiten können. Die Physiklehrkräfte stehen also vor allem für mögliche

Verständnisfragen zur Verfügung und optional für die Gestaltung des Experiments. Da die Rolle von Lehrkräften und ihr Einfluss auf das Mindset der Schüler*innen bekannt ist (Growth Mindset Classroom, vgl. dazu Rattan et al. (2012), gibt es zusätzliches Material mit Hintergrundwissen zum Growth Mindset und wie es im täglichen Unterricht gefördert werden kann für die Lehrkräfte.

5. Studiendesign

In der vorliegenden Untersuchung aus dem Schuljahr 2022/2023 haben insgesamt 14 Lerngruppen von fünf verschiedenen Schulen teilgenommen. Zu Beginn der Lerneinheit wurde der physikbezogene Mindset-Fragebogen (Goldhorn et al., 2023) ausgefüllt, bevor das Lernbuch „Mach dein Gehirn fit für Physik“ bearbeitet wurde. Etwa acht Wochen nach den Interventions-Physikstunden wurde der Mindset-Fragebogen erneut ausgefüllt. Es handelt sich also um eine explorativ angelegte Interventionsstudie im Pre-Post-Design mit spätem Post-Test und ohne Kontrollgruppe. Am Pre-Test haben 219 Schüler*innen der Jahrgangsstufen 7 bis 10 teilgenommen.

6. Ergebnisse

Da die Interventionsmaterialien zum Zeitpunkt der Studie nur papierbasiert vorlagen, gab es mit Pre-Test, Lernbuch und Post-Test drei Zeitpunkte, zu denen die teilnehmenden Schüler*innen ihren individuellen, sechsstelligen Code angeben mussten. Im Matching-Prozess konnten, auch nach sorgfältiger Prüfung der Handschriften und möglicher Verwechslungen bei den Angaben, nur $N = 115$ Schüler*innen gefunden werden, von denen Pre-Test,

Lernbuch und Post-Test vorliegen. In Goldhorn et al. (2024) wird bereits ein erster Einblick in die Ergebnisse vorgestellt, jedoch nur mit $N = 70$ Schüler*innen, deren Identifizierungscodes bereits im automatisierten Matching übereinstimmen.

Um einen möglichen Effekt der Lerneinheit auf das physikbezogene Mindset der Schüler*innen zu untersuchen, werden zunächst die Mittelwerte der drei Skalen des Mindset-Fragebogens im Pre- und Post-Test verglichen. Diese können Tab. 1 entnommen werden.

Tab. 1: Mittelwerte M und Standardfehler SE des Fragebogens im Pre-Post-Vergleich.

	Pre-Test ($M \pm SE$)	Post-Test ($M \pm SE$)
Intelligenz	$4.29 \pm .10$	$4.41 \pm .10$
Begabung	$4.31 \pm .09$	$4.15 \pm .09$
Anstrengung	$4.43 \pm .09$	$4.30 \pm .09$

Die Unterschiede der Mittelwerte sind nur klein und der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test zeigt für keine der drei Skalen einen signifikanten Unterschied im Pre-Post-Vergleich. Was sich jedoch signifikant zwischen dem Pre-Test und dem Post-Test unterscheidet, ist die Mindset-Verteilung ($\chi^2(9) = 24.02$, $p = .004$). Zum Zeitpunkt des Pre-Tests sind 39 % der Schüler*innen dem Growth Mindset zugeordnet, 20 % dem Fixed Mindset (Intelligenz) und 11 % dem Fixed Mindset (Physikbegabung), die verbleibenden 30 % werden dem Mixed Mindset zugeordnet. Beim Post-Test, also ca. acht Wochen nach der Lerneinheit, passt das Antwortverhalten von 40 %



Abb. 1: Sankey-Diagramm zur Darstellung der Veränderungen der Mindset-Verteilung zum Pre-Zeitpunkt (links) und Post-Zeitpunkt (rechts) (eigene Erstellung).

der Schüler*innen zum Growth Mindset, 18 % werden dem Fixed Mindset (Intelligenz) zugeordnet, 17 % dem Fixed Mindset (Physikbegabung) und 25 % dem Mixed Mindset. Besonders in der Gruppe des Fixed Mindset (Physikbegabung) ist eine deutliche Veränderung sichtbar: aus Sicht des Interventionsziels, also das physikbezogene Growth Mindset der Schüler*innen zu stärken, scheint dies jedoch eine nicht gewünschte Veränderung zu sein. Um einen besseren Einblick in die Veränderung zu erhalten, werden die Veränderungen in der Mindset-Zuordnung mit einem Sankey-Diagramm (Abb. 1) analysiert. Im Unterschied zum rein rechnerischen Vergleich (45 Schüler*innen werden im Pre-Test dem Growth Mindset zugeordnet und 47 Schüler*innen im Post-Test), visualisiert das Sankey-Diagramm, wie sich diese Zahlen zusammensetzen. Betrachtet man also die 45 Growth-Mindset-Schüler*innen, so bleiben über die Hälfte, nämlich 28 Schüler*innen auch nach der Intervention diesem Mindset zugeordnet. 12 Schüler*innen wechseln ins Mixed Mindset, was einen niedrigeren Growth-Mindset-Score bedeutet. Nur drei bzw. zwei Schüler*innen wechseln vom Growth Mindset ins Fixed Mindset (Physikbegabung) bzw. Fixed Mindset (Intelligenz). Bei den zwei Fixed Mindsets sieht man im Sankey-Diagramm, dass nur ein kleiner Teil über die Intervention hinweg stabil bleibt. Beim Fixed Mindset (Intelligenz) sind das 5 von 23 Schüler*innen. Mehr als Dreiviertel dieser Fixed-Mindset-Gruppe aus dem Pre-Test werden im Post-Test also einem anderen Mindset zugeordnet. Ähnlich ist es beim Fixed Mindset (Physikbegabung): von den 13 Schüler*innen im Pre-Test verbleiben nur drei in diesem Mindset.

7. Diskussion

Die Lerneinheit „Mach dein Gehirn fit für Physik“ wurde als Growth-Mindset-Intervention entwickelt, dementsprechend war das Ziel der vorliegenden Studie, mögliche Effekte der Lerneinheit auf das physikbezogene Mindset der Schüler*innen zu untersuchen. Die dargestellten Ergebnisse zeigen, dass es im Pre-Post-Vergleich Veränderungen beim Mindset der Schüler*innen gab. Diese zeigen sich nicht im Mittelwert-Vergleich der zwei Zeitpunkte der Datenerhebung mit dem Fragebogen (vgl. Tabelle 1), aber in der Mindset-Verteilung, die auf dem Fragebogen basiert, zeigt der Chi-Quadrat-Test nach Pearson einen signifikanten Unterschied im Pre-Post-Vergleich. Besonders die Gruppe „Fixed Mindset (Physikbegabung)“ fällt auf, da sie von 11 % im Pre-Test auf 17 % im Post-Test ansteigt. Dieses Ergebnis für sich genommen, genau wie die nicht messbare Veränderung bezogen auf die Mittelwerte des Fragebogens, zeigen nicht den erhofften Growth-Mindset-Shift. Gleichzeitig kann und muss man an dieser Stelle auch die Limitationen der vorliegenden Studie beachten. Es handelt sich um eine explorative Studie ohne Kontrollgruppe. Dementsprechend kann zwar

festgehalten werden, dass die Lerneinheit nicht zu einem allgemein höheren Growth-Mindset-Wert im Fragebogen führt, es bleibt jedoch offen, ob sie möglicherweise einer deutlichen Verschlechterung des Werts entgegenwirken kann, denn die Erhebungen mit dem Mindsetfragebogen haben gezeigt, dass der Anteil der Schüler*innen mit einem physikbezogenen Growth Mindset im Verlauf der Sekundarstufe I deutlich sinkt (vgl. Goldhorn et al., 2023). Um das zu untersuchen, müsste eine Studie mit einer Kontrollgruppe durchgeführt werden.

Die vorliegende Studie ist explorativ angelegt, soll also nicht einen vermuteten Effekt nachweisen, sondern zeigen, ob und falls ja, in welchen Schüler*innengruppen die Lerneinheit möglicherweise eine Wirkung zeigt. Bei der Betrachtung verschiedener Gruppen wird zunächst nach dem Mindset (im Pre-Test) unterschieden. Dabei zeigt das Sankey-Diagramm, dass die Schüler*innen, die zum Pre-Test-Zeitpunkt einem der Fixed Mindsets zugeordnet werden, sich im Post-Test auf die verschiedenen Mindsets aufteilen, während mehr als die Hälfte der Schüler*innen, die beim Pre-Test dem Growth Mindset zugeordnet werden, auch im Post-Test dieses Mindset haben. Das lässt vermuten, dass durch die Intervention besonders bei den Schüler*innen eine Veränderung des Mindsets hervorgerufen wird, die vorher eine Tendenz zum Fixed Mindset in ihren Überzeugungen haben. Das passt zu Ergebnissen von allgemeinen Mindset-Interventionen, die eine signifikant stärkere Wirkung der Growth-Mindset-Intervention auf Fixed-Mindset-Teilnehmer*innen beschreiben (Paunesku et al., 2015; Yeager et al., 2016). Obwohl im besten Fall alle Schüler*innen von einer Growth-Mindset-Intervention profitieren sollten, ist die Fixed-Mindset-Gruppe gleichzeitig die wichtigste Zielgruppe, denn bei ihr geht es nicht nur um eine Stärkung bereits vorhandener Überzeugungen, sondern um einen Wechsel der zugrunde liegenden Überzeugung. Falls sich dieses Ergebnis in der genaueren Datenanalyse bestätigen lässt, würde es den Einsatz der Lerneinheit zur Growth-Mindset-Förderung im Physikunterricht bestärken.

8. Ausblick

Wie in den vorherigen Abschnitten ausgeführt, zeigt zwar die Mittelwertanalyse im Pre-Post-Vergleich der gesamten Interventionsgruppe keinen Effekt, jedoch scheint die Lerneinheit bei den Fixed-Mindset-Schüler*innen aus dem Pre-Test zu mehr Veränderung ihres physikbezogenen Mindsets zu führen, da es im Pre-Post-Vergleich zu viel Wechsel des Mindsets kommt. Um dieser Beobachtung nachzugehen, sollten gruppenbezogene Mittelwertanalysen gemacht werden. Außerdem sind die Limitationen der vorliegenden Erhebung zu beachten: die beobachteten Effekte der Intervention beziehen sich nur auf die recht begrenzten Stichprobe von $N = 115$ Schüler*innen. Außerdem gibt es noch keine Erhebung mit einem Pre-Post-Design mit Kontroll-

gruppe, um zu untersuchen, welche Veränderungen des Mindsets im Zeitraum zwischen Pre- und Post-Test möglicherweise auftreten, wenn keine Growth-Mindset-Intervention durchgeführt wird.

9. Literatur

- Aronson, J., Fried, C. B., & Good, C. (2002). Reducing the Effects of Stereotype Threat on African American College Students by Shaping Theories of Intelligence. *Journal of Experimental Social Psychology*, 38(2), 113–125. <https://doi.org/10.1006/jesp.2001.1491>
- Blackwell, L. S., Trzesniewski, K. H., & Dweck, C. S. (2007). Implicit Theories of Intelligence Predict Achievement Across an Adolescent Transition: A Longitudinal Study and an Intervention. *Child Development*, 78(1), 246–263. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2007.00995.x>
- Burnette, J. L., Billingsley, J., Banks, G. C., Knouse, L. E., Hoyt, C. L., Pollack, J. M., & Simon, S. (2022). A systematic review and meta-analysis of growth mindset interventions: For whom, how, and why might such interventions work? *Psychological Bulletin*. <https://doi.org/10.1037/bul0000368>
- Dweck, C. S. (2000). *Self-theories: Their role in motivation, personality, and development*. Taylor & Francis.
- Dweck, C. S., & Yeager, D. S. (2019). Mindsets: A View From Two Eras. *Perspectives on Psychological Science*, 14(3), 481–496. <https://doi.org/10.1177/1745691618804166>
- Goldhorn, L., Wilhelm, T., & Spatz, V. (2022a). Domain-specific theories of intelligence: How students' mindsets in physics change without interventions. In F. Le Hebel & V. Kind (Hrsg.), *Part Learning science: Cognitive, affective, and social aspects* (S. 161–167).
- Goldhorn, L., Wilhelm, T., & Spatz, V. (2022b). Mindsets in Physik nach einem Jahr Lernen unter Pandemie-Bedingungen. In S. Habig (Hrsg.), *Unsicherheit als Element von naturwissenschaftsbezogenen Bildungsprozessen* (Bd. 42, S. 468–471).
- Goldhorn, L., Wilhelm, T., & Spatz, V. (2023). Mach dein Gehirn fit für Physik: Eine digitale Lerneinheit zur Förderung des Growth Mindset. *PhyDid B - Didaktik Der Physik - Beiträge Zur DPG-Frühjahrstagung*. DPG-Frühjahrstagung, Hannover. <https://ojs.dpg-physik.de/index.php/phydid-b/article/view/1330>
- Goldhorn, L., Wilhelm, T., & Spatz, V. (2024). Interventionsstudie zur Förderung des Growth Mindset in Physik. In H. v. Vorst (Hrsg.): *Frühe naturwissenschaftliche Bildung*, Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Jahrestagung in Hamburg 2023, 44, 2024, 390 – 393 https://gdcp-ev.de/wp-content/uploads/securepdfs/2024/06/G03_Goldhorn.pdf
- Goldhorn, L., Wilhelm, T., Spatz, V., & Rehberg, J. (2020). Fixed und Growth Mindset: Selbstbilder von Schüler*innen in Physik. *PhyDid B - Didaktik der Physik—Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*, 1., *PhyDid B - Didaktik der Physik, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*(1), 187–191.
- Hong, Y., Chiu, C., Dweck, C. S., Lin, D. M.-S., & Wan, W. (1999). Implicit theories, attributions, and coping: A meaning system approach. *Journal of Personality and Social Psychology*, 77(3), 588–599. <https://doi.org/10.1037/0022-3514.77.3.588>
- Jäncke, L. (2014). Das plastische Hirn. *Lernen und Lernstörungen*, 3, 227–235.
- Molden, D. C., & Dweck, C. S. (2006). Finding „Meaning“ in Psychology: A Lay Theories Approach to Self-Regulation, Social Perception, and Social Development. *American Psychologist*, 61(3), 192–203. <https://doi.org/10.1037/0003-066X.61.3.192>
- Mueller, C. M., & Dweck, C. S. (1998). Praise for intelligence can undermine children's motivation and performance. *Journal of Personality and Social Psychology*, 75(1), 33–52. <https://doi.org/10.1037/0022-3514.75.1.33>
- Paunesku, D., Walton, G. M., Romero, C., Smith, E. N., Yeager, D. S., & Dweck, C. S. (2015). Mind-Set Interventions Are a Scalable Treatment for Academic Underachievement. *Psychological Science*, 26(6), 784–793. <https://doi.org/10.1177/0956797615571017>
- Rattan, A., Good, C., & Dweck, C. S. (2012). “It’s ok — Not everyone can be good at math”: Instructors with an entity theory comfort (and demotivate) students. *Journal of Experimental Social Psychology*, 48(3), 731–737. <https://doi.org/10.1016/j.jesp.2011.12.012>
- Shively, R. L., & Ryan, C. S. (2013). Longitudinal changes in college math students' implicit theories of intelligence. *Social Psychology of Education*, 16(2), 241–256. <https://doi.org/10.1007/s11218-012-9208-0>
- Sisk, V. F., Burgoyne, A. P., Sun, J., Butler, J. L., & Macnamara, B. N. (2018). To What Extent and Under Which Circumstances Are Growth Mind-Sets Important to Academic Achievement? Two Meta-Analyses. *Psychological Science*, 29(4), 549–571. <https://doi.org/10.1177/0956797617739704>
- Skeide, M. A., Wehrmann, K., Emami, Z., Kirsten, H., Hartmann, A. M., Rujescu, D., & Legascreen Consortium. (2020). Neurobiological origins of individual differences in mathematical ability. *PLOS Biology*, 18(10), e3000871. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3000871>
- Spatz, V., & Goldhorn, L. (2021). When It's More Difficult, I Just Cram More! An Exploratory

Interview Study on Students' Mindsets in Physics. *European Journal of Science and Mathematics Education*, 9(3), 92–109.

<https://doi.org/10.30935/scimath/10948>

Yeager, D. S., Hanselman, P., Walton, G. M., Murray, J. S., Crosnoe, R., Muller, C., Tipton, E., Schneider, B., Hulleman, C. S., Hinojosa, C. P., Paunesku, D., Romero, C., Flint, K., Roberts, A., Trott, J., Iachan, R., Buontempo, J., Yang, S. M., Carvalho, C. M., ... Dweck, C. S. (2019). A national experiment reveals where a growth mindset improves achievement. *Nature*, 573(7774), 364–369.

<https://doi.org/10.1038/s41586-019-1466-y>

Yeager, D. S., Romero, C., Paunesku, D., Hulleman, C. S., Schneider, B., Hinojosa, C., Lee, H. Y., O'Brien, J., Flint, K., Roberts, A., Trott, J., Greene, D., Walton, G. M., & Dweck, C. S. (2016). Using design thinking to improve psychological interventions: The case of the growth mindset during the transition to high school. *Journal of Educational Psychology*, 108(3), 374–391.

<https://doi.org/10.1037/edu0000098>

Yeager, D. S., Trzesniewski, K. H., & Dweck, C. S. (2013). An Implicit Theories of Personality Intervention Reduces Adolescent Aggression in Response to Victimization and Exclusion.

Child Development, 84(3), 970–988.

<https://doi.org/10.1111/cdev.12003>

Mobiles Schülerlabor im Industriemuseum

- Ein Design-based Research-Projekt -

Michael Komorek* & Kai Bliesmer*

*Didaktik der Physik und Wissenschaftskommunikation, Universität Oldenburg
michael.komorek@uni-oldenburg.de

Kurzfassung

Der Bereich non-formaler Bildungsangebote wächst beständig und es gibt zahlreiche Tendenzen, non-formale, außerschulische MINT-Angebote mit den schulischen MINT-Angeboten zu verknüpfen (vgl. Tischer & Komorek in diesem Band). Auch besteht ein Bedarf von Kindern und Familien, non-formale MINT-Bildungsangebote für den Freizeitbereich aufzuschließen (Komorek & Hini-borch, 2024). Im vorliegenden Beitrag geht es in erster Linie darum, verschiedene non-formale Bildungsangebote komplementär, also einander ergänzend zu verknüpfen. Die Experimentierangebote des Schülerlabors physiXS der Universität Oldenburg werden mobilisiert und stationieren sich im Industriemuseum Nordwolle in Delmenhorst. Eine dort bestehende Museumführung für Schulklas-sen wird so angepasst, dass zu bestimmten Themen der Führung physikalische Experimente es den Schüler:innen verdeutlichen sollen, vor welchen technischen und naturwissenschaftlichen Proble-men die Nordwolle-Fabrik seinerzeit stand und welche Lösungen gefunden wurden. Die Schüler:innen mehrerer 8. Schulklassen einer IGS sind an den Stationen selbst aktiv geworden. In einem De-sign-based Research-Verfahren (Reinmann, 2005) wird die Kombination von Führungselementen und Experimentierelementen variiert, um zum einen die Passung beider Teile des konkreten Ange-bots zu optimieren und um zum anderen generelle Erkenntnisse über die Kombination klassischer Museumsführung und interaktiver Experimentierstationen zu gewinnen. Der Beitrag informiert über das empirische Vorgehen und über den Transfer der Erkenntnisse auf ein Angebot des Museums-schiffs „Feuerschiff Norderney“ in Wilhelmshaven.

1. Non-formale MINT-Bildung

Für Schulklassen sind vielfältige non-formale MINT-Bildungsangebote verschiedenster Bildungsinstituti-onen außerhalb der Schule vorhanden und sie werden auch umfangreich genutzt (Jungwirth, Harsch, Kor-flür & Stein, 2020; Beyer et al., 2021). Teilweise ge-schieht das im Rahmen von Klassenausflügen und Wandertagen, die vor allem soziale Funktionen erfül-len sollen. Teilweise werden die Exkursionen auch im Fachunterricht vor- und nachbereitet (vgl. Tischer & Komorek in diesem Band). Im MINT-Bereich sind es vor allem Schülerlabore an Universitäten oder bei Fir-men, Science Center, Regionale Umweltbildungszent-ren und Nationalpark-Häuser, die mit ihren Angebo-ten potenziell den naturwissenschaftlichen Unterricht bereichern können. Ob dies der Fall ist und unter wel-chen Bedingungen, ist eine empirisch zu klärende Frage (Komorek, 2020). Auch Museen können hier eine wichtige Rolle spielen, zählen sie doch zu den beliebten Exkursionszielen von Schulklassen. Natur-kundemuseen, Technikmuseen oder Industriemuseen können eine intensive Kontextualisierung für das na-turwissenschaftlich-technische Lernen bieten.

In einem gemeinsamen Projekt der Physikdidaktik der Universität Oldenburg mit ihren Schülerlabor physiXS, dem Industriemuseums Nordwolle in Delmenhorst und der IGS Delmenhorst wurde ein Kon-zept erarbeitet, wie zwei non-formale MINT-Bil-

dingsangebote kombiniert werden können, um ihre Potenziale gegenseitig und komplementär zu nutzen. Grundidee ist hierbei, dass Museen mit ihren authen-tischen Exponaten, ihren Geschichten und der Mög-lichkeit einer Zeitreise eine historisch eingebette-te Primärerfahrung (Lewalter & Greyer, 2009) bieten, während Schülerlabore die Interaktivität mit Expona-ten und Materialien erlauben, die potenziell die Wahrnehmung von Selbstwirksamkeit bei Schüler:in-nen unterstützen (Sajons, 2020). In der Kombination beider Angebote soll eine sinnstiftende (Muckenfuß, 1995), kognitiv und affektiv anregende Lernumge-bung entstehen.

Das Projekt ist als Design-based Research-Projekt an-gelegt (Reimann, 2005). Das bedeutet, dass es meh-rere Durchläufe (Zyklen) gegeben hat bzw. weitere anstehen. Die Entwicklung und Anpassung der Mu-seumsführung sowie der Experimentierstationen wird hierbei empirisch begleitet, sodass aufeinander fol-gende Zyklen systematisch verändert werden konnten und können, je nach Rückmeldung aus den empiri-schen Erhebungen. Design-based Research (DBR) bedeutet zudem, dass generalisierte Erkenntnisse aus allen Zyklen zusammengekommen einen Mehrwert für die didaktische Strukturierung ähnlicher kombi-nierter Angebote ergeben. In einem DBR-Prozess werden also immer auch der Transfer und der allge-meine Erkenntnisgewinn mitgedacht, sodass sich

DBR von reiner Evaluationsforschung zur Verbesserung bestehender Angebote abhebt.

Im Projekt haben im ersten Zyklus Schüler:innen aus vier 8. Schulklassen einer Integrierten Gesamtschule im Industriemuseum die Geschichte der Elektrifizierung der Garnfabrik erkundet und an Experimentierstationen in der Generatorhalle des Museums Energieumwandlungen, industrielle Energiequellen und mechanische und elektrische Antriebe untersucht. Das Geschichtliche hat dabei als Kontext für das Physikalische gedient (Vanderbilt, 1990) und im Gegenzug sollten die physikalischen Erkenntnisse an Experimentierstationen den Schüler:innen helfen, die Museumserfahrung zu reflektieren. Eine Hypothese ist dabei, dass das komplementäre Angebot (Tischer, Sajons & Komorek, 2023) aus Führung und Experimentieren Synergien für ein mehrperspektivisches Verständnis für Probleme und Lösungen der historischen Garnfabrik bei den Schüler:innen hervorruft (Bliesmer & Komorek, 2024).

2. Museumsführung und Experimentierstationen im ersten Design-Zyklus

Für die Führung der insgesamt acht Schülergruppen aus den vier Schulklassen durch das Industriemuseum Nordwolle¹ wurde auf ein vorhandenes Führungskonzept gesetzt, dass das Museum standardmäßig für Schulklassen bereithält. Kombiniert wurde die Führung mit Experimentierstationen, die im Rahmen von drei Bachelorarbeiten (Baudisch & Hollwedel, 2024; Ranters, 2024; Sibahi, 2024) entwickelt worden sind. Eine Station thematisierte die mögliche zukünftige Nutzung von Windenergie für industrielle Aufgaben; eine andere Station griff das Problem der Energieübertragung auf dem weitläufigen Industriegelände auf; an einer weiteren Station untersuchten die Schüler:innen das Konzept der Dampfmaschine mit historischen Bezügen. Die vierte Station befasste sich mit der möglichen zukünftigen Nutzung von Wasserstoff als Energieträger in einer Fabrik.

Die Führung wurde von erfahrenen Museumsführer:innen durchgeführt. Sie erklärte die Historie der Garn- und Textilfabrik mit Blick auf die Arbeitsbedingungen, das Leben der Betreiberfamilie, die geografische Lage und die verschiedenen Funktionen der Gebäudeteile. Zudem ging die Führung auf die Maschinen, deren Antrieb und die Erzeugung der notwendigen Energie durch die werkseigenen Generatoren ein. Berichtet wird in der Führung z. B., wie der Antrieb der Maschinen auf dem Fabrikgelände zunächst durch einen mehrere hundert Meter weiten Riemen- und Wellenantrieb realisiert wurde. Dieser wurde Ende des 19. Jahrhundert durch elektrische Antriebe mit lokal positionierten Elektromotoren ersetzt. Die Dampfmaschine in der Werkshalle diente dabei zunächst dem direkten mechanischen Antrieb und trieb später einen elektrischen Generator an, bevor die Fabrik an das städtische Elektrizitätsnetz an-



Abb. 1: Dynamot-Aufbau als Analogmodell zu Entwicklung der Energieversorgung in der Garn-Fabrik Nordwolle; Bildquelle: M. Komorek

geschlossen wurde.

Der eine Teil der Schüler:innen startete mit einer 90minütigen Führung und arbeitete nach einer Pause 90 Minuten an vier Experimentierstationen. Der andere Teil der Schüler:innen begann mit der Experimentierphase. Es hat sich gezeigt, dass diese zeitliche Struktur für die Schüler:innen problematisch ist, denn Führung und Stationen sind zu weit separiert, um eine mentale Verknüpfung beider Anteile zu erreichen.

Die vier Experimentierstationen griffen bestimmte Aspekte der Energieversorgung und ihres Wandel auf, sodass die Schüler:innen vertiefte experimentelle Erfahrungen im aufgemachten historischen Kontext selbst sammeln und vertiefen konnten.

2.1 Station „Dynamot zur elektrisch-mechanischen Energieübertragung“

Diese Station nutzte den als Dynamot bekannten Aufbau der Fa. Cornelsen, der aus zwei identischen Generator-Motor-Einheiten besteht (Abbildung 1). Eine Einheit fungiert beim Dynamot als Generator, z. B. indem an ihr gekurbelt wird oder ein Gewicht eine Drehung verursacht. In bis zu drei Metern Entfernung steht die zweite Einheit, die als Motor fungiert und z. B. ein Gewicht anheben oder Licht erzeugen kann. Es gibt zwei Möglichkeiten der Kopplung beider Einheiten, was der historischen Situationen analog ist. Beide Einheiten lassen sich zum einen durch einen Riemenantrieb miteinander verbinden. Die entspricht dem Riemenantrieb der Garnfabrik aus der Zeit vor der

¹ <https://nordwolle-museen.jimdofree.com>

Elektrifizierung. In dem Fall müssen die Riemen-scheiben an Generator und Motor fluchten, was historisch bestimmte Einschränkungen bedeutete. Zum andere können die Schüler:innen beide Einheiten durch elektrische Kabel miteinander verbinden. Dies bietet sowohl beim Modell und als auch historisch den Vorteil, dass Generator und Motor beliebig zueinander platziert werden können bzw. konnten. Mit der Elektrifizierung ist also eine Flexibilisierung der örtlich Bedingungen in der Fabrik einhergegangen; der elektrischen Antrieb löste dann auch den mechanischen Antrieb sehr schnell ab. Ziel für die Schüler:innen ist es an der Station, die Vor- und Nachteile



Abb. 2: Schüler:innen aus 8. Klassen einer IGS experimentieren in Generatorhalle des Industriemuseums Nordwolle mit Dampfmaschinenmodellen; Bildquelle: M. Komorek

der Antriebe selbst zu erproben und dies auf die in der Führung genannten Herausforderungen für den maschinellen Antrieb zu beziehen. Generator und Motor des Dynamot-Aufbaus wurden für eine modelhafte Darstellung der damaligen Generatorhalle und der Maschinenhalle mit Pappkartons kenntlich gemacht, um die Kontextualisierung zu verdeutlichen.

2.2 Station „Zukunftsenergie Wind für Fabriken“

Auch an dieser Station wurden handelsübliche Experimentierkoffer zum Thema der Energiewandlung/Windenergie der Fa. Phywe genutzt. Aus den Koffern wurden bestimmte Bauteile verwendet. Die Kontextualisierung der Station lief so ab, dass die Schüler:innen der Frage nachgehen sollten, inwiefern sich eine Fabrik wie die Nordwolle selbst mit Windenergie versorgen könnte, indem ein oder mehrere Windräder auf ihrem Gelände aufgestellt wären. Die Schüler:innen untersuchten mit Modellwindrädern,

wie Windstärke, Windrichtung und -winkel die Energieausbeute beeinflussen. Und sie erkundeten die Versorgungssicherheit für den Fall, dass die Energieversorgung der Fabrik autark zu sein hätte. Sie untersuchten dazu auch Energiespeicher, die überschüssige Windenergie zwischenspeichern konnten. An der Station setzten sie experimentell Kondensatoren ein. Hierbei sollten sie einen Bezug zur historische Situation herstellen, denn die Fabrik hat sich in ihrer Geschichte bereits autark mit Energie versorgt, indem sie ihre eigene Antriebsenergie (über Dampf) produzierte (wofür allerdings ein Kohlereservoir notwendig war).

2.3 Station „Dampfmaschine als historisches Prinzip der Energieumwandlung“

Diese Station griff das für die Nordwolle im Museum und auch während der Führung allgegenwärtige Thema des Dampftriebs auf. Ziel für die Schüler:innen war es zu erkunden, wie erhitztes Wasser Dampf zu einer Drehbewegung führt, die dann als mechanischer Antrieb genutzt wird. Im historischen Fall geschah das teilweise mit dem Umweg über einen Generator, der mechanische Energie in elektrische umwandelte und sie dann den Elektromotoren bereitstellte. An der Station erhitzen die Schüler:innen Wasser in einer an einem Faden aufgehängten Metalldose. Die Dose hatte seitlich Öffnungen, durch die entstehender Dampf mit einer tangentialen Bewegungskomponente entweichen konnte und so eine Drehbewegung der Dose hervorrief. Die Schüler:innen konnten den Aufbau variieren. Daneben standen Dampfmaschinenmodelle aus dem Modellbauhandel zur Verfügung (Abbildung 2). Zudem sollten die Schüler:innen mittels bebildeter Begriffskarten den zyklischen thermodynamischen Prozess einer Dampfmaschine nachvollziehen, um eine begriffliche Repräsentation zu erreichen.

2.4 Station „Wasserstoff als Energie-Speichermedium für die Fabrik“

Wie Energieproduktion und -speicherung auf alternativem Weg erreicht werden kann, wurde an einer Station mit einem Wasserstoffauto aufgegriffen; sie war von ihrer Zielsetzung ähnlich der Windenergiestation. Zu ihr gehörte eine Brennstoffzelle, die gleichzeitig als Elektrolyseur fungieren konnte. Auch hierbei wurde wieder auf ein Modell der Lehrmittellindustrie zurückgegriffen. Die Brennstoffzelle saß auf einem Chassis und bildete zusammen mit einem Elektromotor ein Fahrzeug. Die Schüler:innen sollten erproben, wie sich mit Hilfe von Solarzellen und dem Elektrolyseur Wasser dissoziieren lässt, wie sie dadurch Wasserstoff speichern und später wiederum kontrolliert elektrische Energie zum Antrieb erzeugen können. Energieumwandlungsketten wurden von den Schüler:innen gezeichnet und die Nutzung von H₂ in der Industrie wurde angesprochen bzw. von den Schüler:innen auch selbst erarbeitet.

Die vier Stationen und das notwendige schriftliche

Begleitmaterial wurden von vier Lehramtsstudierenden der Physik im Rahmen ihrer Abschlussarbeiten (Baudisch & Hollwedel, 2024; Ranters, 2024; Sibahi, 2024) entwickelt. Experimentell nicht thematisiert (außer bei der Station zur Windstation) wurden im ersten DBR-Zyklus weitere mögliche fachliche Anknüpfungspunkte zwischen Fabrik und Physik wie etwa die Herstellung von Garn und Zwirn mit Bezug etwa zu Fragen der mechanischen Reibung für die Festigkeit der Garne bzw. Zwirne. Dies hatte dann eine Konsequenz für den zweiten DBR-Zyklus, zumal auch von den Schüler:innen hier ein Fehl beklagt wurde.

2.5 Setting und Begleitforschung

Vier 8. Klassen der Integrierten Gesamtschule (insg. 105 Schüler:innen) nutzten das Angebot. Die Klassen wurden jeweils halbiert; die eine Hälfte nahm zuerst an der Führung teil und experimentierte danach und umgekehrt. Da die Erprobung an zwei Experimentiertage mit einer Woche Abstand stattfand, konnten dazwischen noch kleinere Veränderungen vorgenommen werden, ohne die didaktische Struktur grundlegend zu verändern. Insbesondere der Freiraum, den die Schüler:innen an den Stationen hatten, wurde vergrößert und es wurde stärker das Lösen bestimmter Probleme in den Vordergrund gerückt. Die Problemorientierung mittels Problemlöseaufgaben wurde stärker zum leitenden Prinzip an den Stationen. Somit wurden DBR-artige Änderungen sogar innerhalb des ersten Zyklus vorgenommen.

Führung und Experimentierteil dauerten jeweils 90 Minuten. Die folgenden Daten wurden während der Erprobung im ersten DBR-Zyklus erhoben: Beobachtungsdaten mittels eines zuvor theoretisch abgeleiteten Beobachtungsrasters; teilstrukturierte Gruppeninterviews mit den Halbklassen am Ende beider Aktionsteile; und Follow-up-Klassengespräche in der Schule 14 Tage nach dem Museumsbesuch zur Rekapitulation des Erlebten.

Bei den Gruppenbefragungen am Ende des kombinierten Angebots wurde z. B. gefragt:

- Welche Experimente haben euch an etwas erinnert, was ihr während der Führung gehört oder gesehen habt?
- Welche Informationen der Führung haben euch beim Experimentieren geholfen? Welche Experimente haben euch beim Verstehen der Führung geholfen?
- Wie hängen die vier Experimentierstationen zusammen?
- Worüber möchtet ihr mehr erfahren und z. B. in der Schule weiter untersuchen oder besprechen?
- Was war gut, was war nicht so gut?

Im Follow-up-Interview wurden in etwa die gleichen Fragen gestellt. Hinzu kam aber die Frage, was an den Angebot geändert werden sollte, welche Wünsche also bestanden. Im Rahmen der studentischen Ab-

schlussarbeiten wurden Beobachtungsnotizen und Befragungsergebnisse ausgewertet und aufeinander bezogen. Ein Teil der Auswertung im Sinne von DBR war es, Ideen für konzeptuelle Änderungen am Angebot mit Blick auf einen zweiten DBR-Zyklus herauszuarbeiten.

2.6 Ergebnisse des ersten DBR-Zyklus

Affektive Ebene: Grundsätzlich führte das komplementär ausgerichtete Museumsangebot aus Führung und physikalischen Experimenten zu einer hohen Motivation bei den beteiligten Schüler:innen. Da nach Angabe der Schüler:innen in der Schule weniger als gewünscht experimentiert wird, war es für sie anregend, mal ‚selbst was tun zu dürfen‘. Auch wirkte die Museumumgebung grundsätzlich anregend, wenngleich alle Schüler:innen das Museum bereits kannten. Motivational problematisch haben die Schüler:innen wahrgenommen, dass die Führung generell nicht optimal auf 8-Klässler abgestimmt, sondern für ein gemischtes Erwachsenenpublikum konzipiert war. Sie enthielt aus Sicht der Schüler:innen zu wenige explizite Anker, die an den Experimentierstationen aufgegriffen werden konnten. Dies ist erklärbar, weil die Führung nicht explizit für die Kombination mit interaktiven Stationen aufbereitet war. Motivational erschwerend kam bei manchen Schüler:innen hinzu, dass sie sprachliche Barrieren hatten, weshalb sie die Komplexität des Angebots kaum erfassen konnten. Als demotivierend wurde benannt, dass die Garnherstellung nicht aufgegriffen wurde, obwohl sie einen großen Anteil in der Führung hatte. Insbesondere im Follow-up-Gruppeninterview in der Schule wurde aber deutlich, dass die Schüler:innen trotz geäußerter Probleme den erlebten Museumsbesuch als eine ‚tolle Sache‘ wahrgenommen hatten.

Kognitive Ebene: Mit den Gruppeninterviews direkt nach der Durchführung des Museumsangebots wurde geklärt, inwiefern die Schüler:innen die beabsichtigten Zusammenhänge zwischen den Experimentierstationen zwischen Führung und Stationen erkannt haben, bzw. welche eigenen Zusammenhänge sie hergestellt haben. Bei den Stationen ‚Dampfmaschine‘ und ‚Dynamot/Antriebe‘ stellten die SuS einen engen Bezug zur Führung her. Die Stationen zu alternativen Energien wie Wind und Wasserstoff wiesen jedoch zu weit über die in der Museumsführung dargebotenen historischen Zusammenhänge hinaus. Hier konnten die Schüler:innen kaum Anknüpfungen herstellen. Durch die zwischenzeitliche Überarbeitungen der Stationen hin zu mehr Problemorientierung und problemlösender Eigenaktivität stellten jene Schüler:innen, die am zweiten Experimentiertag dabei waren, mehr und explizite Verknüpfungen zwischen den Angebotsteilen her. Fachliches Lernen wurde nicht explizit erhoben, dennoch teilweise festgestellt. Insgesamt wurde die Museumsführung von den 8-Klässlern größtenteils als losgelöst oder sogar als unnötig für die Bearbeitung der Stationen eingestuft.

Ebene Weiterentwicklung: Kleinere Überarbeitungen

fanden bereits zwischen beiden Erprobungstagen statt. Ein Bedarf bestand aber weiterhin darin, die Führung stärker auf die Energieproduktion und auf physikalische Aspekte der Garnverarbeitung auszurichten und die Stationen zu Wind und Wasserstoff besser zu kontextualisieren oder sie zu ersetzen.

3. Der zweite Design-Zyklus

Im ersten DBR-Zyklus zeigte sich, dass die Kombination zweier non-formaler MINT-Angebote, hier Museums und Schülerlabor, zunächst hohes Motivationspotenzial aufweist. Herausfordernd war aber die Abstimmung beider Anteile, um eine für Schüler:innen wahrnehmbare Komplementarität und keine simple Addition zu erreichen. Eine weitere Optimierung des kombinierten Angebots ist daher für den zweiten Zyklus notwendig. Dieser umfasst drei Änderungsbereiche.

3.1 Führung und Experimente ineinander schachteln

Die Begleitforschung zeigte, dass die zeitlich langen und separierten Blöcke der Führung (90 min) und der Experimente (90 min) die Schüler:innen erstens demotivierte. Zweitens verhinderte diese Struktur, dass die Schüler:innen eine gedankliche Nähe zwischen aufgemachten historischen Problemen und damaligen Herausforderungen einerseits und Problemlösungen an den Experimentierstationen andererseits herstellen konnten. Damit wurden Führung und Experimente insgesamt als zusammenhangslos wahrgenommen.

Im zweiten DBR-Zyklus werden nun Führung und Experimente ineinander geschachtelt (vgl. Abbildung 3). In vier jeweils 15minütigen Führungsteilen werden historische Probleme und Herausforderungen thematisiert und an bestimmten Exponaten erläutert. Es wird ein zu lösendes Problem herausgearbeitet, das die Schüler:innen nun durchdenken und experimentell untersuchen sollen. Nach dem Führungsteil folgt eine Experimentierstation in räumliche Nähe der authentischen Exponate und Text- bzw. Bildquellen. Diese Experimentierphase dauert 25 Minuten. Am Ende der Experimentierphase sollen die Schüler:innen ihre Untersuchungsergebnisse auf den damaligen historischen Kontext mit seiner konkreten Herausforderung beziehen. Moderiert werden Führungsteil und Experimentierteil von ein und derselben Person.

Durch diese Struktur entstehen vier Parts zu je 40 Minuten, die zusammen mit Pausen das dreistündige Zeitfenster des Museumsbesuchs ausmachen.

3.2 Neue physikalische Experimentierstationen

Die Rückmeldungen der Schüler:innen im ersten DBR-Zyklus veranlassten, die Stationsauswahl zu überdenken. Erhalten bleibt die Station zu den mechanischen und elektrischen Antrieben mithilfe des Dynamot-Experimentalkoffers. Grund ist hier, dass der Antrieb von Maschinen ein zentrales Thema im Museum ist, die historische Entwicklung der Fabrik repräsentiert und von Seiten der Schüler:innen als

anregende Station wahrgenommen wurde. Gleiches gilt für die Station zur Dampfmaschine, die erhalten bleibt. Die Erzeugung von Dampf und die Nutzung dessen thermischer Energie zur Umwandlung in gerichtete Rotationsenergie stellt für die Nordwolle und die damalige Zeit ein zentrales Elementarium dar. Die Rückmeldungen der Schüler:innen zu dieser Station waren auch sehr positiv.

Die Stationen zu Wind und Wasserstoff werden ersetzt. Ihre Verknüpfung mit Elementen der Führung wirkte im ersten Zyklus künstlich und wurde von den 8-Klässlern nicht nachvollzogen.

Neu hinzu kommt eine Station zum Thema Zeit und Zeitmessung. Das physikalische Basiskonzept der Zeit hatte für die Industrialisierung auf dem Weg hin zur getakteten Fließbandarbeit eine enorme Bedeutung, die direkt auf die Arbeitssituation der Arbeiter:innen zurückwirkte. Wie Zeit gemessen wurde und wird, inwiefern das Zeitgefühl eine subjektive Wahrnehmung darstellt und wie aus Zeitmessung eine Zeittaktung wird, die den Arbeitsalltag durchstrukturierte, wird an der Station zunächst im Führungspart problematisiert und anhand von Experimenten untersucht.

Hinzu kommt außerdem eine Station zum Thema Garn- und Zwirnherstellung. Dies ergibt sich zum einen dadurch, dass das Hauptprodukt der Nordwolle Garne und Zwirne waren und in der Führung üblicherweise über den Weg der Wolle vom Schaf über ihre Reinigung, die Kämmung und Verfilzung bis zum Garn berichtet wird. Zum anderen bestand der Wunsch der Schüler:innen darin, hierzu eine eigene Station vorzufinden. Physikalisch gesehen, spielen hier Aspekte von Reibung, Druck, Verhakung von Wollfäden, Festigkeit unter Zug eine Rolle, die an der Station experimentell untersucht werden. Z. B. erproben die Schüler:innen, wie sich die Festigkeit von Garn und Zwirn unterscheidet und wie man Festigkeit messen kann.

Da in der Nordwolle Garne auch gefärbt wurden, wird ein Anteil der Station auch die Frage nach guten Lichtbedingungen sein, die benötigt werden, um die Färbewirkung zu beurteilen.

3.3 Einbettung in den Unterricht

Im ersten DBR-Zyklus war der Museumsbesuch nicht explizit in den Fachunterricht eingebettet. Die Schulklassen kamen und wussten lediglich, wohin es geht. Im zweiten DBR-Zyklus wird der Besuch im Museum explizit vorbereitet und auch nachbereitet. Wie Tischer & Komorek (in diesem Band), auch Tischer & Komorek (2024) aus einem anderen Projekt berichten, hat eine systematische Vorbereitung des Besuches eines außerschulischen Lernorts direkte Auswirkung auf die Motivation, sind mit Inhalten am außerschulischen Lernort zu befassen, und darauf, ein Verständnis aufzubauen. Im vorliegenden Projekt spielen im zweiten DBR-Zyklus die Lehrkräfte eine größere Rolle als bisher. Mehrere Treffen mit ihnen drehen

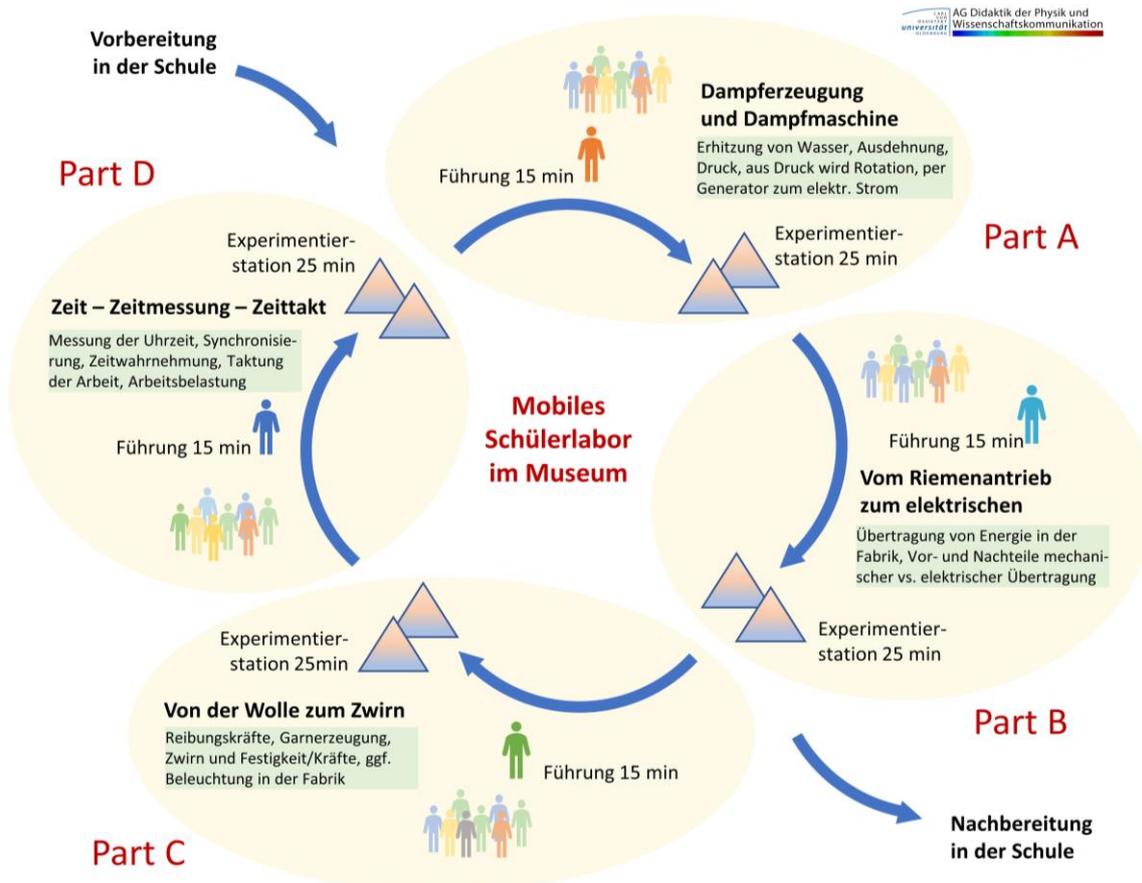


Abb. 3: Struktur der Führung mit Experimentierstationen zu zentralen Aspekten des Museums Nordwolle in Delmenhorst; Ergebnis eines Designs-based Research-Prozesses für den zweiten Design-Zyklus; eigene Darstellung

sich um die Einbettung des Museumsbesuchs in den Arbeitsplan von erneut mitwirkenden 8-Klässlern. Die Vorbereitung soll sich aus den Anforderungen des Kern- und des Schulcurriculum ableiten lassen; es sollen mit den Schüler:innen Fragen erarbeitet werden, die sich offensichtlich nicht in der Schule beantworten lassen und dadurch motivieren sollen, das Außerschulische aufzusuchen. Nach Rückkehr in die Schule sollen bestimmte Aspekte der Experimente im Museum insbesondere im Physikunterricht untersucht werden. Selbst einfache Kraftmesser oder Uhren zu konstruieren, elektrische Energieübertragung vertieft zu erforschen oder thermodynamische Eigenschaften von Gasen zu erkunden, bietet sich nach dem Museumsbesuch an.

Aber nicht nur der MINT-Unterricht wird bereichert, denn die MINT-Experimente können auch Impulse für Fächer wie Arbeit-Wirtschaft-Technik oder eben noch naheliegender für den Geschichtsunterricht liefern, indem man die heutige und die damalige Arbeitswelt besser versteht.

4. Transfer auf das Museumsschiff Norderney

Die Erfahrungen mit dem Projekt mit der Nordwolle in Delmenhorst wird derzeit übertragen auf ein weiteres Museum, das Museumsschiff Norderney des

Küstenmuseums in Wilhelmshaven. Die Norderney ist ein Feuerschiff gewesen, also ein stationär verankerter Leuchtturm auf See, speziell in der Wesermündung. In dieser Funktion ausgedient, liegt es als öffentlich besuchbares Museumsschiff im Hafen von Wilhelmshaven.

Derzeit wird in gleicher Struktur, wie sie oben dargestellt ist, eine Führung entwickelt, die ebenfalls Experimentierstationen umfasst. Die Führung besteht aus sechs Parts mit historisch relevanten Problemen, die entweder von den Erbauern dieses und weiterer Schiffe oder von der Mannschaft gelöst werden mussten. Erprobt wird die Führung vor allem mit Kleingruppen von Schüler:innen der 7. und 8. Klasse einer IGS aus Wilhelmshaven. Die Stationen sind die folgenden.

- **Schiffslage auf See stabilisieren:** Damit ein Feuerschiff seinen Dienst erfolgreich erfüllen kann, muss es stabil in der See liegen. Durch Wind und Wellen wirken aber zahlreiche Kräfte auf das Schiff, das mit einer periodischen Wipp-Bewegung, dem „Rollen“, reagiert. Folgen sind zum einen Seekrankheit der Mannschaft, aber auch, dass das Licht des Feuerschiffs nicht waagrecht ausgestrahlt wird. An der entsprechenden Experimentierstation gibt es ein Wasser-

bassin mit einem Schiffsmodell, das von den Schüler:innen modifiziert werden kann. Die Problemlöseaufgabe ist also die Stabilisierung des Schiffsrumpfes, wofür verschiedene Materialien zur Verfügung stehen. Es können z. B. Flügel, Schwerter und Ausleger konstruiert werden. Zum Schluss wird die damals übliche Nutzung von „Bilgenkielen“ vorgestellt und berichtet, wie heutige Schiffe aktive Stabilisatoren nutzen.

- **Licht bündeln:** Eine weitere Herausforderung von Feuerschiffen (wie bei allen optischen Leuchttürmen) war es, Licht zu bündeln, es am besten zu parallelisieren, damit es konzentriert noch in weiter Entfernung gesehen wird. Die Lösung ist ein Linsensystem, bei dem die Lichtquelle im Brennpunkt platziert wird. Da große Glaskörper schwer sind, wurden früher Fresnel-linsen eingesetzt, bei denen nur die gekrümmten Teil der Linse, die für die Brechung verantwortlich sind, zusammen einen Linsenkörper bilden. An der Experimentierstation sollen die Schüler:innen eine Lösung für die Bündelung von Licht suchen, z. B. auch mit Spiegeln, verspiegelten Röhren oder eben auch mit Linsen. Experimentiert wird unter Deck im Dunklen unter Nutzung einer sehr schwachen Lichtquelle. Zum Schluss wird berichtet, wie heute Radar die optischen Leuchttürme ersetzt.
- **Navigieren per Magnetismus:** Eine dritte Station thematisiert die Schwierigkeit, auf See zu navigieren und den eigenen Standort zu bestimmen. Historisch wurde der Erdmagnetismus mit Hilfe von kleinen Magneten, die einen Kompass bildeten, genutzt. An der Experimentierstation werden Eigenschaften von Magneten untersucht und die Schüler:innen sollen die Lage des Museumsschiffes anhand markanter Punkte der Hafenbucht bestimmen und auf einer Seekarte einzeichnen. Sie sollen dabei auf dem Schiff erkunden, wo das Magnetfeld der Erde durch das Metall des Schiffes am wenigsten beeinflusst und abgelenkt wird (Missleitung). Zum Schluss wird ihnen berichtet, welche Rolle noch heute die Navigation per Kompass spielt und wie die Satellitennavigation heute zum Standard geworden ist.

Drei weitere Stationen sind in die Führung integriert, eine zur Funktion und Bedeutung des Echolots und der Schallausbreitung unter Wasser, eine zum Schiffsantrieb und den zu bedenkenden Kräften und eine zur Schwimmfähigkeit von Schiffen, deren Dichte bekanntlich größer ist als die von Wasser. Bei allen fachlichen und historischen Fragen zählt sich die Kooperation mit den pädagogisch Leitenden des Küstenmuseums und dem Techniker an Bord sehr aus.

5. Fazit und Ausblick

Die Diskussion um den kontextorientierten Physikunterricht hat eine lange Geschichte. Bekannt ist die mögliche motivierende Wirkung von Kontexten

unter bestimmten Bedingungen; aber auch kognitiv können Kontexte das fachliche Lernen unterstützen und dabei das Image, dass gerade Physik hat, verbessern. Die oben dargestellten Beispiele entsprechen dem „kontextstrukturierten“ Zugang (Nawrath & Komorek, 2013), wonach das Ziel der Vermittlung ist, einen Problemkontext besser zu verstehen und innerhalb des Kontextes handlungsfähig zu werden. Physik (und andere fachliche Disziplinen) haben hierbei eine dienende Funktion, sind also nicht Selbstzweck, sondern helfen bei der individuellen Befähigung, mit Problemen umzugehen.

In beiden Kooperationen mit dem Museum Nordwolle in Delmenhorst und dem Küstenmuseum in Wilhelmshaven bestehen zwei weitergehende Ziele. Erstens dass die von Studierenden entwickelten Angebote (Experimente und auch die Führungen) von den Museen übernommen werden und ins reguläre Programm übernommen werden. Hierzu gibt es in beiden Fällen positive Signale. Der enge Einbezug der Museen bei Entwicklung und Erprobung entspricht dem Aspekt der Design-Methodologien (Reinmann, 2005), wonach Innovationen im Bildungssystem nur dann funktionieren und nachhaltig sind, wenn die beratenen Partner sich mit der Innovation identifizieren.

Das zweite Ziel ist, dass die beteiligten Schulen die neuen Museumangebote in der beschriebenen Weise einbetten und damit zur Innovation ihrer Fachunterrichte nutzen. Dann wäre eine wünschenswerte Koevolution schulischer und außerschulischer MINT-Bildung gegeben. Empirische Entwicklungsforschung von Seiten der Universität kann dann in der hier beschriebenen Weise einen Beitrag zur Regionalentwicklung leisten.

6. Literatur

- Baudisch, A. & Hollwedel, B. (2024). Untersuchung mechanischer und elektrischer Energieübertragung und die Erschließung von Windenergie für die industriellen Nutzung. Bachelorarbeit. Universität Oldenburg.
- Beyer, L., Gorr, C., Kather, C., Komorek, M., Röben, P. & Selle, S. (Hrsg.) (2021). Orte und Prozesse außerschulischen Lernens erforschen und weiterentwickeln (Außerschulische Lernorte – Beiträge zur Didaktik, Bd. 6). Münster: Lit.
- Bliesmer, K. & Komorek, M. (2024). Bedeutung des non-formalen Lernens für die MINT-Bildung. Interviewstudien mit Stakeholdern und Familien. In M. Hemmer u. a. (Hrsg.). Fachdidaktik im Zentrum von Forschungstransfer und Transferforschung. Beiträge zur GFD-ÖGFD-Tagung in Wien 2022. Reihe Fachdidaktische Forschungen, Band 16. (S. 253-266). Waxmann.
- Jungwirth, M., Harsch, N., Korflür, Y. & Stein, M. (Hrsg.), *Forschen.Lernen.Lehren an öffentlichen Orten – The Wider View* (Schriften zur Allgemeinen Hochschuldidaktik, Bd. 5), S. 57-76. Münster: WTM-Verlag.

- Komorek, M., & Hiniborch, J. (2024). Wie ticken Familien? Oldenburger Online-Publikations-Server. Verfügbar unter: http://oops.uni-oldenburg.de/6942/1/MINT-Befragung_Familien.pdf
- Komorek, M. (2020). Forschendes Lernen für außerschulische Lernprozesse. In J. Dohnicht und B. Seelhorst (Hrsg.), *Bildung – ein Auslaufmodell?* (Seminar, Bd. 3/2020), 133-147. Schneider.
- Lewalter, D. & Greyer, C. (2009). Motivationale Aspekte von schulischen Besuchen in naturwissenschaftlich-technischen Museen. *Zeitschrift für Erziehungswissenschaft* 12, 28-44.
- Muckenfuß, H. (1995): *Lernen im sinnstiftenden Kontext. Entwurf einer zeitgemäßen Didaktik des Physikunterrichts*. Berlin: Cornelsen.
- Nawrath, D. & Komorek, M (2013). Kontextorientierung. Rekonstruktion einer fachdidaktischen Konzeption für den Physikunterricht. *ZfdN* 19, 233-257.
- Ranters, L. (2024). *Wasserstoff als Energieträger für den Antrieb von Fahrzeugen und Maschinen – Ein Bildungsprojekt für Schulen im Industriemuseum Nordwolle in Delmenhorst*. Bachelorarbeit. Universität Oldenburg
- Reinmann, G. (2005). Innovation ohne Forschung? Ein Plädoyer für den Design-Based Research-Ansatz in der Lehr-Lernforschung. *Unterrichtswissenschaft*, 1, 52-69.
- Sajons, C. (2020). Kognitive und motivationale Dynamik in Schülerlaboren. Kontextualisierung, Problemorientierung und Autonomieunterstützung der didaktischen Struktur analysieren und weiterentwickeln. Logos.
- Sibahi, M. (2024). *Kontextualisierung der Dampfmaschine als Energiewandler in der Industrie*. Bachelorarbeit. Universität Oldenburg.
- Tischer, J., Sajons, C. & Komorek, M. (2023). Komplementär vernetzte formale und non-formale MINT-Bildung. In H. van Vorst (Hrsg.). *Lernen, Lehren und Forschen in einer digital geprägten Welt*. GDPC Jahrestagung 2022. (S. 306-309). GDPC.
- Tischer, J. & Komorek, M. (2024). Komplexe Kontexte in komplementär vernetzten Lernangeboten. In H. van Vorst (Hrsg.). *Frühe naturwissenschaftliche Bildung*. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik in Hamburg 2023, 586-589.
- Vanderbilt, Cognition and Technology group (1990). *Anchored Instruction and Its Relationship to Situated Cognition*. *Educational Researcher*, 19 (6), 2-10.

Danksagung

Den pädagogischen Leitenden bzw. Geschäftsführenden der beiden beteiligten Museen sei herzlich gedankt, Bernd Entelmann vom Museum Nordwolle in Delmenhorst und Michael Steinert vom Küstenmuseum in Wilhelmshaven für ihre tatkräftige Unterstützung des Projekts.

Motivation durch Wahl: Autonomieförderung im Physikunterricht

Laura Pannullo*, Nils Kunisch*

* AG Physik und ihre Didaktik, Universität Bielefeld
laura.pannullo@physik.uni-bielefeld.de

Kurzfassung

Motivation ist aus Sicht der Physikdidaktik und aus Perspektive von Lehrkräften ein zentrales Ziel des Physikunterrichts. Nach der Selbstbestimmungstheorie von Deci und Ryan entsteht (intrinsische) Motivation dann, wenn Grundbedürfnisse wie Autonomie, Kompetenz und soziale Bezogenheit erfüllt werden. Insbesondere das Autonomieerleben spielt dabei eine entscheidende Rolle. Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, wie Physikunterricht gestaltet werden kann, der das Autonomieerleben fördert. Wahlmöglichkeiten gelten in der Theorie als effektive Maßnahme zur Förderung von Autonomie und konnten in anderen Bereichen und Kontexten bereits positive Effekte auf affektiv-motivationale Merkmale zeigen. Der Beitrag widmet sich dieser Fragestellung und präsentiert Ergebnisse aus zwei Studien, in denen Wahlmöglichkeiten in Experimentierphasen als autonomiefördernde Maßnahme untersucht wurden. In den Studien wurde analysiert, inwiefern die Implementation von Wahlmöglichkeiten u.a. die Motivation von Schüler*innen beeinflusste. Die Studien zeigten, dass Wahlmöglichkeiten beim Experimentieren das Interesse und Vergnügen (als Selbstberichtswert intrinsischer Motivation) der Schüler*innen fördern können, während die Wahl des Offenheitsgrads der Experimentieranleitung insgesamt keine Auswirkungen auf die Motivation hatte – allerdings wirkte sich eine fehlende Wahl bei geöffneter Anleitung tendenziell motivationsmindernd aus.

1. Autonomie im Unterricht

Autonomie (griech.: auto-nomos, Selbst-Gesetz) beschreibt, inwiefern das Verhalten durch das Selbst bestimmt und reguliert wird (Benke & Müller, 2018; Ryan & Deci, 2017). Sie reflektiert damit den Grad der Übereinstimmung zwischen äußeren Einflüssen und den eigenen Überzeugungen, Werten und Interessen (Markus, 2023). Externe Einflüsse, die mit den persönlichen Überzeugungen im Einklang stehen, führen dabei nicht zu einem niedrigeren Grad von Autonomie. Die Wahrnehmung von Entscheidungsspielräumen, die in einem Handeln mündet, das mit den eigenen Motiven im Einklang steht, wird als Autonomieerfahrung bezeichnet (Benke & Müller, 2018). Reeve et al. (2003) betonen dabei insbesondere die subjektive Wahrnehmung und Reflexion des eigenen, selbstbestimmten Handelns. Diese Form der Selbstbestimmung wird von ihnen begrifflich vom übergeordneten Konzept der Autonomie abgegrenzt.

Autonomie ist nicht nur ein grundlegendes psychologisches Bedürfnis (Deci & Ryan, 1993), sondern zugleich ein bedeutsames Bildungsziel, insbesondere im Kontext von Selbstständigkeit und Identitätsentwicklung (Benke & Müller, 2018). Krapp et al. (2014) betonen insbesondere die Bedeutung der wahrgenommenen Autonomie als grundlegende Voraussetzung für Motivation. Dieser motivationale Aspekt von Autonomie im schulischen Kontext stützt die Forderung nach lernförderlichen Umgebungen, die Autonomie gezielt unterstützen.

Eine wesentliche Strategie zur Steigerung des Autonomieerlebens ist das Angebot von Wahlmöglichkeiten (Niemiec & Ryan, 2009; Skinner & Belmont, 1993), da Schüler*innen Aufgaben auswählen können, die mit ihren Interessen und Zielen übereinstimmen (Assor et al., 2002). Auch nach Deci und Ryan (1987) geht Autonomie mit dem Erleben von Wahlmöglichkeiten einher. Entsprechend lässt sich Autonomie als Wahlmöglichkeit operationalisieren (Wilde et al., 2018).

Gleichzeitig ist der empirische Forschungsstand zur Wirkung von Wahlfreiheit allgemein und im Unterricht insgesamt als uneinheitlich zu bewerten (Katz & Assor, 2007). Studien zeigen teils positive Effekte, teils aber auch geringe oder differenzierte Wirkungszusammenhänge in Abhängigkeit von Kontext und Umsetzung. Ein Überblick über den aktuellen Stand der Forschung erfolgt im nächsten Abschnitt.

2. Stand der Forschung zu Autonomie

Der Zusammenhang zwischen Autonomie und verschiedenen Lern- und Personenmerkmalen ist in zahlreichen Studien untersucht worden. Im Folgenden wird der Forschungsstand zu den Wirkungen von Autonomie auf drei Ebenen dargestellt: Fachwissen und kognitive Leistungen, Interesse und Motivation sowie Unterrichtsbedingungen und Selbstwirksamkeitserwartungen.

2.1. Auswirkung von Autonomie auf Fachwissen, kognitive Leistungen und Lernerfolg

Autonomieerleben führt in einigen Studien zu erhöhtem kognitivem Engagement (Assor et al., 2002) und besserer Lernleistung (Reeve, 2002; Ryan & Deci, 2002). Zudem steigern autonomieförderliche Lernarrangements das konzeptionelle Lernen im Vergleich zu einer kontrollierenden Lernumgebung (Grolnick & Ryan, 1987). Im Kontext von Hausaufgaben zeigten Patall et al. (2010) positive Effekte von Wahlmöglichkeiten auf den Fachwissenszuwachs.

Allerdings zeigte sich in anderen Studien keine Auswirkung auf das (kognitive) Engagement (Flowerday & Schraw, 2003; Flowerday & Shell, 2015), auf das Lernen (Flowerday & Shell, 2015) und auf die Leistung oder den Lernerfolg beim Fremdsprachenlernen (d'Ailly, 2004). Eine Studie fand sogar einen kleinen negativen Effekt von Wahlmöglichkeiten auf das Verfassen von Inhaltsaufsätzen (Flowerday et al., 2004).

2.2. Auswirkung von Autonomie auf Interesse und Motivation

Zahlreiche Studien belegen positive Effekte von Autonomieerleben auf das Interesse von Lernenden. So konnte Hartinger (2006) einen positiven Zusammenhang von Interesse am Unterricht und wahrgenommenen Mitbestimmungsmöglichkeiten zeigen. Auch spezifische Formen von Wahlmöglichkeiten, etwa die Wahl des Themas (Desch et al., 2015) oder der Beispiele (Høgheim & Reber, 2017; Reber et al., 2009), erwiesen sich als wirksam bei der Steigerung des situativen Interesses. Allerdings zeigen sich in der Forschung auch widersprüchliche Ergebnisse. So berichten Flowerday und Shell (2015) sowie d'Ailly (2004) keine signifikanten Effekte von Wahlmöglichkeiten auf das situative Interesse der Lernenden, u.a. im Kontext vom Fremdsprachenlernen.

Im Gegensatz dazu bestätigen empirische Studien, dass subjektiv wahrgenommene, autonomieunterstützende bzw. selbstbestimmte Lernumgebungen und autonomieunterstützendes Verhalten der Lehrkraft mit einer hohen intrinsischen Lernmotivation korrelieren (Deci & Ryan, 2000; Gillet et al., 2013; Reeve, 2006; Ryan & Deci, 2000, 2017; Tsai et al., 2008). Zudem konnte der von der Selbstbestimmungstheorie postulierte Zusammenhang zwischen dem Erleben von Autonomie und intrinsischer Motivation belegt werden (vgl. Deci & Ryan, 2000). Auch Patall et al. (2008) konnten in einer Metaanalyse signifikante positive Effekte verschiedener Formen von Wahlmöglichkeiten auf die intrinsische Motivation nachweisen. Es wird allerdings eingeräumt, dass Wahlfreiheiten nur Motivation fördern, wenn die zur Wahl stehenden Angebote als interessant und herausfordernd, aber nicht zu komplex wahrgenommen werden (Lipowsky, 2020).

2.3. Auswirkung von Autonomie auf Unterrichtsbedingungen und Selbstwirksamkeitserwartung

Der Einfluss von Autonomieerleben zeigt sich auch auf der Ebene der wahrgenommenen Unterrichtsqualität. So konnten Flunger et al. (2019) und Patall et al. (2010) nachweisen, dass Wahlmöglichkeiten die Einschätzung der Lehr- und Lernbedingungen durch die Schüler*innen verbessern.

Darüber hinaus belegen empirische Studien einen positiven Zusammenhang zwischen Autonomie und der Selbstwirksamkeitserwartung von Lernenden (Flunger et al., 2019; Tilfarlioglu & Ciftci, 2011). Wesentlich dafür ist ein Unterrichtsklima, das von autonomieunterstützendem Verhalten der Lehrkraft geprägt ist. Solche Bedingungen wirken sich günstig auf die Selbsteinschätzung der eigenen Kompetenz der Schüler*innen aus (Deci & Ryan, 1993, 2003; Reeve, 2002).

3. Studien zu Autonomie im Physikunterricht

Um den Zusammenhang zwischen Wahlmöglichkeiten im Physikunterricht und zentralen Schüler*innenvariablen näher zu untersuchen, wurden zwei empirische Studien durchgeführt. Beide Studien gehen der Frage nach, wie sich unterschiedliche Formen der Autonomieförderung – konkret durch Wahlmöglichkeiten im Kontext des Experimentierens – auf Motivation, Selbstwirksamkeitserwartung und kognitive Lernziele auswirken.

Studie 1 entstand im Rahmen einer Dissertation an der Goethe-Universität Frankfurt (Pannullo, 2025) und untersucht Wahlmöglichkeiten beim Zugang zu Experimenten in heterogenen Lerngruppen. Studie 2 wurde im Rahmen einer Masterarbeit an der Universität Bielefeld durchgeführt (Kunisch, 2025) und analysiert den Einfluss der Wahl des Offenheitsgrades von Experimentieranleitungen.

3.1. Wahlmöglichkeiten beim Experimentieren

Die erste Studie untersucht die Auswirkung von Wahlfreiheit in Experimentierphasen. Hierzu wurden zwei Untersuchungsgruppen gebildet: eine Interventionsgruppe und eine Vergleichsgruppe. Während die Interventionsgruppe zwischen verschiedenen Experimenten frei wählen konnte, erhielt die Vergleichsgruppe die Experimente zugewiesen. Die Experimentierphasen wurden in beiden Gruppen durch identische Instruktions- und Sicherungsphasen eingeleitet und abgeschlossen. Zur Erfassung möglicher Effekte wurde ein Prä-Posttest-Design eingesetzt. Die Erhebungen erfolgten mittels Fragebogen vor und nach dem Treatment. Zu den Testinstrumenten gehört ein Fachwissenstest zur Lichtbrechung (Weber et al., 2017), das physikbezogene Selbstkonzept (Hoffmann et al., 1998), die Einschätzung der Lehr- und Lernbedingungen (Seidel, 2003), die Selbstwirksamkeitserwartung beim Experimentieren (Körner & Ihringer, 2016), die Kurzskala intrinsische Motivation (Wilde et al., 2009), die wahrgenommene Wahlfreiheit (Deci

& Ryan, 2003) und ein kognitiver Fähigkeitstest (Heller & Perleth, 2000).

An der Studie haben sieben Lehrkräfte mit 31 Klassen teilgenommen. Je nach Variable konnten zwischen 476 bis 582 Datensätze ausgewertet werden. Ausgewertet wurden die Daten mit (Ko-)varianzanalysen.

3.2. Wahlmöglichkeiten des Offenheitsgrades von Experimentieranleitungen

Die zweite Studie setzt sich mit Wahlmöglichkeiten beim Offenheitsgrad von Experimentieranleitungen auseinander. Sie untersucht als zentrale Fragestellung, inwiefern sich die Wahlmöglichkeit des Offenheitsgrads der Experimentieranleitung auf die intrinsische Motivation von Schüler*innen nach einem Experiment auswirkt. Zudem wurde untersucht, inwieweit die Selbstwirksamkeitserwartung der Schüler*innen diese Wahl beeinflusst.

Die Studie wurde in drei Klassen der Jahrgangsstufe 10 eines Gymnasiums in jeweils einer Doppelstunde durchgeführt. Die Klassen wurden durch dieselbe Lehrkraft unterrichtet. An der Studie nahmen insgesamt 65 Schüler*innen teil. Die Studie wurde im Kontext des Physikunterrichts zum Thema Rotationsenergie durchgeführt und folgt einem quasi-experimentellen Design mit zwei Untersuchungsgruppen: einer Interventionsgruppe und einer Vergleichsgruppe. Beide Gruppen bearbeiteten das Experiment in Einzelarbeit. Die Interventionsgruppe erhielt dabei die Möglichkeit, zwischen einer offenen und einer geschlossenen Experimentieranleitung zu wählen. Die Vergleichsgruppe hingegen wurde einer der beiden Varianten ohne Wahlmöglichkeit zugeteilt. Zur Messung der Selbstwirksamkeitserwartung beim Experimentieren wurde die Skala von Körner und Ihringer (2016) verwendet, während die intrinsische Motivation mithilfe der Kurzskala von Wilde et al. (2009) erfasst wurde.

Die Datenauswertung erfolgte mithilfe von t-Tests bzw. Welch-Tests zur Analyse signifikanter Gruppenunterschiede.

4. Ergebnisse

Im Folgenden werden zentrale Ergebnisse der beiden empirischen Studien vorgestellt, die unterschiedliche Formen von Wahlmöglichkeiten im Physikunterricht untersuchen.

4.1. Wahlmöglichkeiten beim Experimentieren

Die Kovarianzanalyse beim Fachwissen zur Lichtbrechung zeigt eine signifikante Interaktion zwischen Messzeitpunkt und Gruppe mit kleinem Effekt ($p = .039$, partielles $\eta^2 = .01$). Um allerdings aussagen zu können, welche Gruppe einen größeren Lernzuwachs vollziehen konnte, ist ein Blick auf die Mittelwerte in der graphischen Auswertung nötig (siehe Abb. 1). Diese zeigt, dass die Vergleichsgruppe stärker im „Fachwissen“ dazu gewinnt als die Interventionsgruppe. Das bedeutet, dass Wahlfreiheit sich nicht positiv auf das Fachwissen auswirkt.

Sowohl bei der Einschätzung der Unterrichtsbedingungen ($p = .742$, partielles $\eta^2 < .01$) als auch bei der

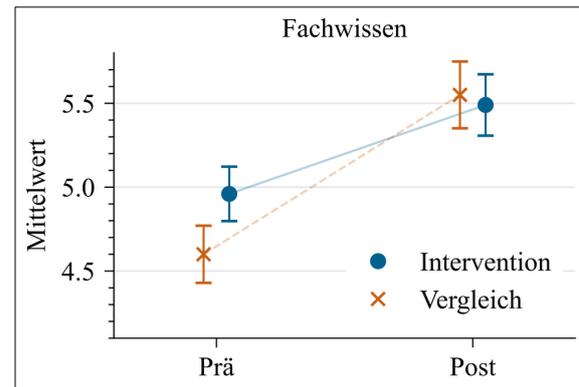


Abb. 1: Mittelwerte der Skala „Fachwissen zur Lichtbrechung“ für den Prä- und Posttest für die Interventions- und Vergleichsgruppe (Eigene Darstellung).

Selbstwirksamkeitserwartung ($p = .242$, partielles $\eta^2 < .01$) konnte keine signifikante Interaktion zwischen Messzeitpunkt und Gruppe und damit keine Auswirkung von Wahlmöglichkeiten festgestellt werden. Dennoch verbesserten sich bei der Selbstwirksamkeitserwartung beide Gruppen.

Bei der Variable Selbstkonzept zeigt sich eine signifikante Interaktion zwischen Messzeitpunkt und Gruppe mit kleinem Effekt ($p = .022$, partielles $\eta^2 = .01$). Jedoch konnte die Vergleichsgruppe ihr Selbstkonzept von Prä- zu Posttest signifikant verbessern, die Interventionsgruppe erfährt keine signifikante Veränderung (siehe Abb. 2). Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Gruppe, der die Experimente vorgegeben wurden, ein positiveres „physikbezogenes Selbstkonzept“ entwickelt.

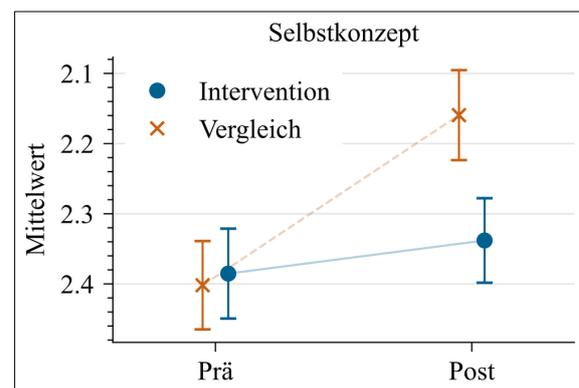


Abb. 2: Mittelwerte der Skala „physikbezogenes Selbstkonzept“ für den Prä- und Posttest für die Interventions- und Vergleichsgruppe (Eigene Darstellung).

Bei der intrinsischen Motivation zeigt die Varianzanalyse in der Gesamtskala keinen Unterschied zwischen den Gruppen ($F(1,580) = 5.54$, $p = .464$, partielles $\eta^2 < .01$). Für die Subskala „Interesse und Vergnügen“ liegt allerdings ein signifikanter Unterschied mit kleinem Effekt zwischen den Gruppen vor ($p < .001$, $\eta^2 = .02$). Dabei weist die Interventionsgruppe bessere Werte in dieser Subskala auf als die

Vergleichsgruppe. Es kann somit gesagt werden, dass sich Wahlfreiheit zumindest positiv auf „Interesse und Vergnügen“ auswirkt. In den anderen Subskalen sind jedoch keine signifikanten Effekte zu finden.

4.2. Wahlmöglichkeiten des Offenheitsgrades von Experimentieranleitungen

Die zweite Studie untersuchte, welchen Einfluss die Wahlmöglichkeit des Offenheitsgrads von Experimentieranleitungen hat. Insgesamt zeigte sich, dass das reine Anbieten einer Wahlmöglichkeit keinen generellen Anstieg der intrinsischen Motivation nach der Durchführung des Experiments bewirkte ($p = .054$, Cohens $d = .44$). Allerdings zeigte sich in der differenzierten Betrachtung der Teilgruppen (siehe Abb. 3) ein starker positiver Effekt der Wahlmöglichkeit auf die Motivation ($p = .002$, Cohens $d = 1.13$). Lernende, die mit der geöffneten Anleitung experimentierten, berichteten eine höhere intrinsische Motivation, wenn sie diese Form selbst gewählt hatten.

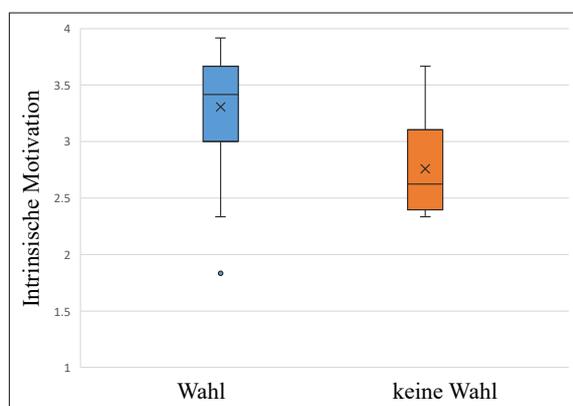


Abb. 3: Einfluss der Wahlmöglichkeit (Wahl, keine Wahl) des Offenheitsgrads der Experimentieranleitung auf die intrinsische Motivation (eingeschränkt auf geöffnete Experimentieranleitung) (Eigene Darstellung).

Darüber hinaus zeigten sich in der Studie Zusammenhänge mit der Selbstwirksamkeitserwartung (siehe Abb. 4). Schüler*innen mit höherer

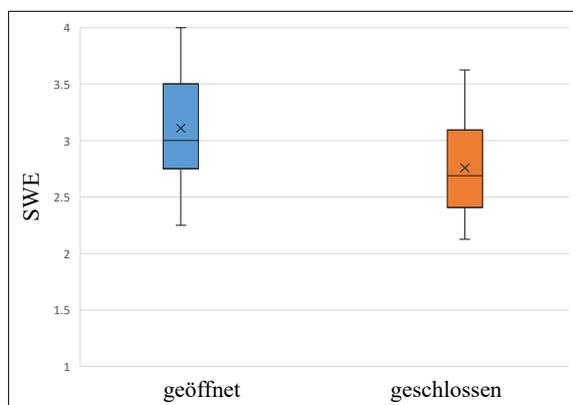


Abb. 4: Einfluss der Selbstwirksamkeitserwartung (SWE) auf die Wahl des Offenheitsgrads der Experimentieranleitung (geöffnete Experimentieranleitung, geschlossene Experimentieranleitung) (Eigene Darstellung).

Selbstwirksamkeit tendierten zur offenen Anleitung, während jene mit niedriger Selbstwirksamkeit häufiger die strukturierte, geschlossene Variante wählten ($p = .012$, Cohens $d = .75$).

Dieser Befund steht im Einklang mit Ergebnissen von Krapp (2005), der feststellte, dass Schüler*innen mit geringerer Selbstwirksamkeitserwartung tendenziell weniger Handlungsfreiheit wünschen. Nach Conrady (2011) führt die Öffnung von Arbeitsphasen insbesondere bei leistungsschwächeren Schüler*innen schnell zu einer Überforderung. Dies weist auf einen differenzierten Umgang mit Wahlfreiheit hin: Die Art der Wahloption (z. B. Komplexitätsgrad) und individuelle Voraussetzungen (wie die Selbstwirksamkeit) spielen eine zentrale Rolle.

Zu berücksichtigen ist allerdings die eingeschränkte Aussagekraft der Studie aufgrund der begrenzten Stichprobengröße, was die Verallgemeinerbarkeit der Ergebnisse einschränkt.

5. Fazit und Implikationen

Die Ergebnisse der beiden vorgestellten Studien zeigen, dass Wahlfreiheit im Physikunterricht gezielt und differenziert eingesetzt werden sollte. In Studie 1, die sich mit der Wahl aus unterschiedlichen Experimenten beschäftigte, konnten nicht alle in der Literatur und empirischen Studien diskutierten positiven Effekte von Wahlmöglichkeiten bestätigt werden. Dennoch zeigte sich, dass insbesondere das Interesse der Schüler*innen durch Wahlfreiheit beim Experimentieren gefördert werden kann.

Studie 2 legte nahe, dass Wahlmöglichkeiten bei der Auswahl des Offenheitsgrads von Experimentieranleitungen vor allem dann wirksam sind, wenn es sich um geöffnete Formen des Experimentierens handelt. Darüber hinaus deuteten die Ergebnisse darauf hin, dass Schüler*innen mit niedriger Selbstwirksamkeitserwartung eher strukturiertere Zugänge bevorzugen, was für die Gestaltung von adaptiven Lernumgebungen relevant ist.

Daraus ergeben sich mehrere didaktische Implikationen. Je nach Zielsetzung eines Experiments sollte Wahlfreiheit in Betracht gezogen werden. Während sich zur Förderung des Interesses Wahlmöglichkeiten beim Zugang zu Experimenten eignen, kann bei offen angelegten Experimentierphasen ein wahlbasierter Zugang insbesondere dann sinnvoll sein, wenn gleichzeitig Alternativen für unterschiedliche Lernvoraussetzungen bereitgestellt werden. So kann Autonomieförderung gezielt zur Unterstützung individueller Lernprozesse beitragen, ohne überfordert oder demotiviert zu wirken.

6. Literatur

Assor, A., Kaplan, H., & Roth, G. (2002). Choice is good, but relevance is excellent: Autonomy-enhancing and suppressing teacher behaviours predicting students' engagement in schoolwork. *British Journal of Educational Psychology*,

- 72(2), 261–278.
<https://doi.org/10.1348/000709902158883>
- Benke, G., & Müller, F. H. (2018). Autonomie im Unterricht. Konzeptionelle Annäherungen und empirische Befunde. In P. Posch, F. Rauch, & S. Zehetmeier (Hrsg.), *Das Lernen von Lehrerinnen und Lehrern, Organisationen und Systemen*. Waxmann Verlag.
- Conradt, C. (2011). *Multimedial unterstütztes Lernen. Intrinsische Motivation & kognitiver Lernerfolg*. Universitätsbibliothek Bayreuth.
- d'Ailly, H. (2004). The Role of Choice in Children's Learning: A Distinctive Cultural and Gender Difference in Efficacy, Interest, and Effort. *Canadian Journal of Behavioural Science / Revue Canadienne Des Sciences Du Comportement*, 36(1), 17–29. <https://doi.org/10.1037/h0087212>
- Deci, E. L., & Ryan, R. M. (1987). The support of autonomy and the control of behavior. *Journal of Personality and Social Psychology*, 53(6), 1024–1037. <https://doi.org/10.1037/0022-3514.53.6.1024>
- Deci, E. L., & Ryan, R. M. (1993). Die Selbstbestimmungstheorie der Motivation und ihre Bedeutung für die Pädagogik. *Zeitschrift für Pädagogik*, 39(2), 223–238.
- Deci, E. L., & Ryan, R. M. (2000). The „What“ and „Why“ of Goal Pursuits: Human Needs and the Self-Determination of Behavior. *Psychological Inquiry*, 11(4), 227–268.
https://doi.org/10.1207/S15327965PLI1104_01
- Deci, E. L., & Ryan, R. M. (2003). *Intrinsic Motivation Inventory*.
<https://selfdeterminationtheory.org/intrinsic-motivation-inventory/>
- Desch, I., Stiller, C., & Wilde, M. (2015). Förderung des situationsspezifischen Interesses durch eine Schülerwahl des Unterrichtsthemas. *Psychologie in Erziehung und Unterricht*, 63(1), 60.
<https://doi.org/10.2378/peu2016.art06d>
- Flowerday, T., & Schraw, G. (2003). Effect of Choice on Cognitive and Affective Engagement. *The Journal of Educational Research*, 96(4), 207–215.
<https://doi.org/10.1080/00220670309598810>
- Flowerday, T., Schraw, G., & Stevens, J. (2004). The Role of Choice and Interest in Reader Engagement. *The Journal of Experimental Education*, 72(2), 93–114.
<https://doi.org/10.3200/JEXE.72.2.93-114>
- Flowerday, T., & Shell, D. F. (2015). Disentangling the effects of interest and choice on learning, engagement, and attitude. *Learning and Individual Differences*, 40, 134–140.
<https://doi.org/10.1016/j.lindif.2015.05.003>
- Flunger, B., Mayer, A., & Umbach, N. (2019). Beneficial for some or for everyone? Exploring the effects of an autonomy-supportive intervention in the real-life classroom. *Journal of Educational Psychology*, 111(2), 210–234.
<https://doi.org/10.1037/edu0000284>
- Gillet, N., Vallerand, R. J., Lafrenière, M.-A. K., & Bureau, J. S. (2013). The mediating role of positive and negative affect in the situational motivation-performance relationship. *Motivation and Emotion*, 37(3), 465–479.
<https://doi.org/10.1007/s11031-012-9314-5>
- Grolnick, W. S., & Ryan, R. M. (1987). Autonomy in children's learning: An experimental and individual difference investigation. *Journal of Personality and Social Psychology*, 52(5), 890–898. <https://doi.org/10.1037/0022-3514.52.5.890>
- Hartinger, A. (2006). Interesse durch Öffnung des Unterrichts—Wodurch?
<https://doi.org/10.25656/01:5519>
- Heller, K., & Perleth, C. (2000). *Kognitiver Fähigkeitstest für 4. Bis 12. Klassen, Revision (KFT 4-12+R)*. Hogrefe.
- Hoffmann, L., Häussler, P., & Lehrke, M. (1998). *Die IPN-Interessenstudie Physik. IPN*.
- Høgheim, S., & Reber, R. (2017). Eliciting Mathematics Interest: New Directions for Context Personalization and Example Choice. *The Journal of Experimental Education*, 85(4), 597–613.
<https://doi.org/10.1080/00220973.2016.1268085>
- Katz, I., & Assor, A. (2007). When Choice Motivates and When It Does Not. *Educational Psychology Review*, 19(4), 429–442.
<https://doi.org/10.1007/s10648-006-9027-y>
- Körner, H.-D., & Ihringer, S. (2016). Selbstwirksamkeit beim Experimentieren – Mädchen und Jungen in den Naturwissenschaften. In C. Wiepcke & M. Kampshoff (Hrsg.), *Vielfalt geschlechtergerechten Unterrichts: Ideen und konkrete Umsetzungsbeispiele für die Sekundarstufen* (1. Aufl., S. 106–140). epubli.
- Krapp, A. (2005). Basic needs and the development of interest and intrinsic motivational orientations. *Learning and Instruction*, 15(5), 381–395.
<https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2005.07.007>
- Krapp, A., Geyer, C., & Lewalter, D. (2014). Motivation und Emotion. In T. Seidel & A. Krapp (Hrsg.), *Pädagogische Psychologie: Mit Online-Materialien zum Download* (6., vollständig überarbeitete Aufl., S. 194–223). Beltz.
- Kunisch, N. (2025). *Untersuchung des Einflusses der Wahlmöglichkeit des Offenheitsgrades von Experimentieranleitungen [Masterarbeit]*. Universität Bielefeld.
- Lipowsky, F. (2020). Unterricht. In E. Wild & J. Möller (Hrsg.), *Pädagogische Psychologie* (S. 69–118). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-61403-7>
- Markus, S. (2023). *Autonomieunterstützung und emotionales Erleben in der Schule: Zusammenhänge der Öffnung von Unterricht mit Lern-*

- und Leistungsemotionen im Mathematikunterricht der Sekundarstufe. Waxmann.
- Niemiec, C. P., & Ryan, R. M. (2009). Autonomy, competence, and relatedness in the classroom: Applying self-determination theory to educational practice. *Theory and Research in Education*, 7(2), 133–144. <https://doi.org/10.1177/1477878509104318>
- Pannullo, L. (2025). Wahlmöglichkeiten beim Experimentieren: Entwicklung und Erprobung eines Konzeptes für Experimente in inklusiven Lerngruppen im Physikunterricht. Logos Verlag Berlin. <https://doi.org/10.30819/5916>
- Patall, E. A., Cooper, H., & Robinson, J. C. (2008). The effects of choice on intrinsic motivation and related outcomes: A meta-analysis of research findings. *Psychological Bulletin*, 134(2), 270–300. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.134.2.270>
- Patall, E. A., Cooper, H., & Wynn, S. R. (2010). The effectiveness and relative importance of choice in the classroom. *Journal of Educational Psychology*, 102(4), 896–915. <https://doi.org/10.1037/a0019545>
- Reber, R., Hetland, H., Chen, W., Norman, E., & Kobbeltvedt, T. (2009). Effects of Example Choice on Interest, Control, and Learning. *Journal of the Learning Sciences*, 18(4), 509–548.
- Reeve, J. (2002). Self-Determination Theory Applied to Educational Settings. In E. L. Deci & R. M. Ryan (Hrsg.), *Handbook of self-determination research* (S. 183–203). University of Rochester Press.
- Reeve, J. (2006). Teachers as Facilitators: What Autonomy-Supportive Teachers Do and Why Their Students Benefit. *The Elementary School Journal*, 106(3), 225–236. <https://doi.org/10.1086/501484>
- Reeve, J., Nix, G., & Hamm, D. (2003). Testing models of the experience of self-determination in intrinsic motivation and the conundrum of choice. *Journal of Educational Psychology*, 95(2), 375–392. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.95.2.375>
- Ryan, R. M., & Deci, E. L. (2000). Intrinsic and Extrinsic Motivations: Classic Definitions and New Directions. *Contemporary Educational Psychology*, 25(1), 54–67. <https://doi.org/10.1006/ceps.1999.1020>
- Ryan, R. M., & Deci, E. L. (2002). An overview of Self-Determination Theory: An organismic-dialectical perspective. In E. L. Deci & R. M. Ryan (Hrsg.), *Handbook of self-determination research* (S. 3–33). University of Rochester Press.
- Ryan, R. M., & Deci, E. L. (Hrsg.). (2017). *Self-Determination Theory: Basic Psychological Needs in Motivation, Development, and Wellness*. Guilford Press. <https://doi.org/10.1521/978.14625/28806>
- Seidel, T. (Hrsg.). (2003). Technischer Bericht zur Videostudie „Lehr-Lern-Prozesse im Physikunterricht“. IPN.
- Skinner, E. A., & Belmont, M. J. (1993). Motivation in the classroom: Reciprocal effects of teacher behavior and student engagement across the school year. *Journal of Educational Psychology*, 85(4), 571–581. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.85.4.571>
- Tilfarlioglu, F. Y., & Ciftci, F. S. (2011). Supporting Self-efficacy and Learner Autonomy in Relation to Academic Success in EFL Classrooms (A Case Study). *Theory and Practice in Language Studies*, 1(10), 1284–1294. <https://doi.org/10.4304/tpls.1.10.1284-1294>
- Tsai, Y.-M., Kunter, M., Lüdtke, O., Trautwein, U., & Ryan, R. M. (2008). What makes lessons interesting? The role of situational and individual factors in three school subjects. *Journal of Educational Psychology*, 100(2), 460–472. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.100.2.460>
- Weber, J., Winkelmann, J., Erb, R., Wenzel, F., Ullrich, M., & Horz, H. (2017). Ein Fachwissenschaftstest zur geometrischen Optik. In C. Maurer (Hrsg.), *Implementation fachdidaktischer Innovation im Spiegel von Forschung und Praxis* (S. 107). Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Jahrestagung in Zürich 2016.
- Wilde, M., Basten, M., Großmann, N., Haunhorst, D., Desch, I., Strüber, M., & Randler, C. (2018). The (non-)benefit of choosing: If you get what you want it is not important that you chose it. *Motivation and Emotion*, 42(3), 348–359. <https://doi.org/10.1007/s11031-018-9675-5>
- Wilde, M., Bätz, K., Kovaleva, A., & Urhahne, D. (2009). Überprüfung einer Kurzsкала intrinsischer Motivation (KIM). *ZfDN*, 15.

Was motiviert Schüler*innen Lehramt zu studieren?

Lion Cornelius Glatz, Teemu Loh, Pauline Czora, Mark Ullrich, Holger Horz, Roger Erb

Goethe-Universität Frankfurt
glatz@physik.uni-frankfurt.de

Kurzfassung

Vor dem Hintergrund rückläufiger Studierendenzahlen im Lehramtsstudium mit dem Fach Physik und generell, stellt sich die Frage, was Schüler*innen motiviert, ein Lehramtsstudium zu beginnen, welche Vorstellungen sie über den Lehrberuf haben, und welche Erwartungen an den Berufsalltag als Lehrkraft existieren. In einer Mixed-Methods-Erhebung an hessischen Schulen wurden deswegen Schüler*innen, die kurz vor dem Abitur stehen, zu ihrer Motivation bei der geplanten Berufswahlentscheidung und zu ihren Erwartungen an den zukünftigen Beruf, bzw. ihr angedachtes Studium oder Ausbildung befragt, mit einem besonderen Fokus auf den Schüler*innen, die ein Lehramtsstudium in Betracht ziehen. Dabei interessiert nicht nur, welche Motive für die Wahl eines Lehramtsstudiums ausschlaggebend sind, sondern auch, inwiefern sich diese oder damit verbundene Faktoren über den Verlauf des Studiums ändern. Aus diesem Grund ist die Studie als (quasi-)längsschnittliche Erhebung geplant, die sowohl Abiturient*innen als auch Studierende in den Blick nimmt. Ein besonderer Fokus ist auf die Wahl der Fächer, speziell aus den Naturwissenschaften, gerichtet.

1. Hintergrund

Eines aktuellen Berichts der Kultusministerkonferenz zufolge ist zu erwarten, dass der bundesweite Lehrkräftemangel als kurz- und mittelfristiges Problem bestehen bleiben wird (Kultusministerkonferenz, 2025). Modellrechnungen zeigen, dass auch in den kommenden zehn Jahren der Bedarf an Lehrkräften nicht durch die erwartete Anzahl an Absolvent*innen des Vorbereitungsdienstes gedeckt werden kann: Rein rechnerisch stehen deutschlandweit einem Bedarf von 417.000 Lehrkräften lediglich 367.000 Absolvent*innen gegenüber. Auch wenn die tatsächliche Lehrkräfteversorgung in den Bundesländern von zusätzlichen länderspezifischen Faktoren abhängt, kann bereits jetzt gesagt werden, dass die Zahlen einen zum Teil erheblichen Bedarf erwarten lassen. Dieses langfristige Problem lässt sich insbesondere auch für das Fach Physik feststellen (ebd.).

Aus einer Analyse des Stifterverbandes aus den Jahren 2019-2023 geht zudem hervor, dass in Relation zu neuen Lehramtsstudierenden die Zahl der Absolvent*innen des Vorbereitungsdienstes weniger als 60 % beträgt (Antoine et al., 2024). Für das Fach Physik sind dafür die hohen Dropout-Raten während des Studiums mitverantwortlich, von denen zuletzt auch in der DPG-Studie zum Lehramtsstudium Physik berichtet wurde (Deutsche Physikalische Gesellschaft et al., 2023).

2. Ziele des Forschungsprojekts „HeLeMo“

Vor dem eben beschriebenen Hintergrund stellt sich die Frage, weshalb so viele Studierende das Lehramtsstudium abbrechen oder in einen fachwissenschaftlichen Studiengang wechseln. Zudem ist die

Frage relevant, mit welcher Motivation Schüler*innen den Lehrberuf wählen und wie sich Erwartungen und Vorstellungen zu dem zukünftigen Beruf sowie damit verbundene Faktoren über den Verlauf des Studiums und des Vorbereitungsdienstes entwickeln. Die Untersuchung dieser Sachverhalte ist insbesondere auch im Kontext der auf Deutschland bezogenen Dropout-Forschung von Interesse, die bisher noch erhebliche Defizite an empirischen Daten verzeichnet (Schmid-Kühn & Fuchs, 2024).

Es ist zwar bekannt, dass eine ausgeprägte intrinsische Studienwahlmotivation bei Lehramtsstudierenden mit einer höheren Studienzufriedenheit einhergeht (Künsting & Lipowsky, 2011), diese sich kompetenter einschätzen und eine stärkere Selbstwirksamkeitserwartung als extrinsisch motivierte Studierende aufweisen (Biermann et al., 2019). Diese Forschungsergebnisse beruhen jedoch vor allem auf retrospektiven Selbsteinschätzungen (Renger et al., 2024), sodass Selektions- und Gedächtniseffekte nicht ausgeschlossen werden können.

Um eine verlässliche Datengrundlage über die Studien- und Berufswahlmotivation von Schüler*innen zu schaffen, werden deshalb im Rahmen des Hessischen Lehrkräftebildungsmonitors, kurz „HeLeMo“, die Gründe und Motivationen für die Wahl eines Lehramtsstudiums, die damit verbundenen Faktoren sowie die Erwartungen an den angehenden Lehrberuf erhoben. Durch das Studiendesign im (Quasi-) Längsschnitt soll dabei auch die Entwicklung dieser Variablen über den Verlauf der gesamten Lehrkräftebildung in den Blick genommen werden.

3. Forschungsfragen

Für die Untersuchung der weiter oben genannten Fragestellungen wurde ein explorativer Forschungsansatz gewählt. Dementsprechend sind die zentralen Forschungsfragen offen formuliert:

- Wie wird der Lehrberuf von Abiturient*innen wahrgenommen?
- Welche Motivationen haben Abiturient*innen für die Wahl eines (Lehramts-) Studiums?
- Mit welchen Faktoren hängt das Interesse an einem Lehramtsstudium zusammen?
- Welche Erwartungen haben Abiturient*innen und Studierende an das Studium, den Vorbereitungsdienst und das spätere Berufsleben?
- Wie unterscheiden sich die Motivationen, Erwartungen und damit verbundenen Faktoren je nach Fächerkombination und Lehramtsart?
- Wie verändern sich die Motivationen und Erwartungen an das spätere Berufsleben sowie die damit verbundenen Faktoren über den Verlauf der Lehrkräftebildung?
- Welche Faktoren stehen in Zusammenhang mit einem erfolgreichen Abschluss des Studiums und des Vorbereitungsdienstes?

4. Studiendesign

Da sich die Forschungsfragen sowohl auf einen längeren Untersuchungszeitraum beziehen als auch verschiedene Stichproben betreffen (Abiturient*innen, Studierende, Lehrkräfte im Vorbereitungsdienst), wird ein Erhebungsdesign gewählt, das mehrere Messzeitpunkte umfasst und Personengruppen auch im Längsschnitt begleitet (s. Abbildung 1).

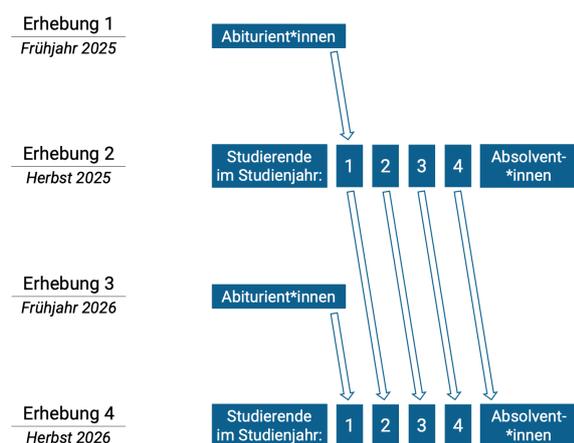


Abb. 1: Erhebungsdesign des Forschungsprojekts HeLeMo (eigene Abbildung)

Zu jedem Erhebungszeitpunkt werden entweder Schüler*innen des Abschlussjahrganges befragt (Frühjahr) oder Studierende in verschiedenen Semestern ihres Lehramtsstudiums und Absolvent*innen (Herbst). Zudem sind weitere Erhebungen im Rahmen des Vorbereitungsdienstes angedacht (in Abbildung 1 nicht dargestellt).

Durch diesen gestaffelten Erhebungsplan ist es möglich, sowohl Erkenntnisse als Momentaufnahmen zu verschiedenen Zeitpunkten der Lehrkräftebildung zu gewinnen, als auch Aussagen über die Entwicklung der untersuchten Variablen über die Zeit hinweg zu treffen.

5. Methoden

Für den ersten Erhebungszeitraum im Frühjahr 2025 wurden in Hessen $N = 1778$ Schüler*innen des Abschlussjahrganges anhand eines Online-Fragebogens, der sowohl quantitative als auch qualitative Anteile enthält, im Rahmen einer Schulstunde (45 min) befragt.

Dabei wurden unter anderem folgende Konstrukte erhoben:

- Berufswahlmotivation (FEMOLA¹, FEMOLA-S², Fit-Choice³, WDQ⁴, MPZM-R⁵)
- Erwartungen an Studium, Vorbereitungsdienst und Lehrberuf (qualitativ)
- Persönlichkeitsmerkmale (NEO-FFI-30⁶)
- wahrgenommene Eignung für den Lehrberuf (FIT-L (R))⁷
- Wahrnehmung des Lehrberufs (Fit-Choice³)
- Schulnoten
- soziodemographische Daten

6. Ausblick

Neben der Auswertung der Ergebnisse der Schüler*innenbefragung, die eine erste Beantwortung der Forschungsfragen a), b), c) und d) erlaubt, ist im aktuellen Jahr auch die Durchführung der Studierendenbefragung geplant.

Da Abiturient*innen aus der ersten Befragung auch Teil dieser zweiten Erhebung sein werden, wird auch dann bereits eine Aussage darüber getroffen werden können, inwiefern ein kurz vor dem Abitur geäußertes Interesse an einem (Physik-) Lehramtsstudium auch zu einer tatsächlichen Aufnahme dieses Studiums führt und inwiefern sich die Gründe und Motivationen für das Studium, die damit verbundenen Faktoren sowie die Erwartungen an den Beruf verändert haben.

¹ adaptiert nach Pohlmann & Möller, 2010

² adaptiert nach Renger et al., 2024

³ adaptiert nach Watt et al., 2012

⁴ adaptiert nach Stegmann et al., 2010

⁵ adaptiert nach Schreiber et al., 2025

⁶ adaptiert nach Körner et al., 2008

⁷ adaptiert nach Faust et al., 2016

7. Literatur

- Antoine, L., Süßenbach, F., & Jorzik, B. (2024). *Der Lehrkräftetrichter: Analyse und Handlungsempfehlungen zur Sicherung der Lehrkräftebildung*. Stifterverband. https://stifterverband.shinyapps.io/daten_navigator_v_0_6_2/#!/analysen_inhalt?st=2&hf=0
- Biermann, A., Dörrenbächer-Ulrich, L., Grassmé, I., Perels, F., Gläser-Zikuda, M., & Brünken, R. (2019). Hoch motiviert, engagiert und kompetent: Eine profilanalytische Untersuchung zur Studien- und Berufswahlmotivation von Lehramtsstudierenden: Nutzung von Lerngelegenheiten und Kompetenzen im Praktikum. *Zeitschrift für Pädagogische Psychologie*, 33(3–4), 177–189. <https://doi.org/10.1024/1010-0652/a000242>
- Deutsche Physikalische Gesellschaft, Woitzik, A., Mecke, K., & Düchs, G. (2023). *Das Lehramtsstudium Physik in Deutschland*. Deutsche Physikalische Gesellschaft e.V.
- Faust, S., Schaarschmidt, U., & Fischer, A. W. (2016). *Fit für den Lehrerberuf?! (FIT-L(R))*. Kohlhammer. https://dl.kohlhammer.de/content/downloads/978-3-17-032427-5/978-3-17-032427-5_zp.pdf
- Körner, A., Geyer, M., Roth, M., Drapeau, M., Schmutzer, G., Albani, C., Schumann, S., & Brähler, E. (2008). Persönlichkeitsdiagnostik mit dem NEO-Fünf-Faktoren-Inventar: Die 30-Item-Kurzversion (NEO-FFI-30). *PPmP - Psychotherapie · Psychosomatik · Medizinische Psychologie*, 58(6), 238–245. <https://doi.org/10.1055/s-2007-986199>
- Kultusministerkonferenz. (2025). *Lehrkräfteeinstellungsbedarf und -angebot in der Bundesrepublik Deutschland 2024 – 2035 – Zusammengefasste Modellrechnungen der Länder*. https://www.kmk.org/fileadmin/Daten/pdf/Statistik/Dokumentationen/Dok_2_Bericht_LEB_LEA_2024.pdf
- Künsting, J., & Lipowsky, F. (2011). Studienwahlmotivation und Persönlichkeitseigenschaften als Prädiktoren für Zufriedenheit und Strategienutzung im Lehramtsstudium. *Zeitschrift für Pädagogische Psychologie*, 25(2), 105–114. <https://doi.org/10.1024/1010-0652/a000038>
- Pohlmann, B., & Möller, J. (2010). Fragebogen zur Erfassung der Motivation für die Wahl des Lehramtsstudiums (FEMOLA) | Dieser Beitrag wurde unter der Herausgeberschaft von D. Leutner und D. H. Rost bearbeitet. *Zeitschrift für Pädagogische Psychologie*, 24(1), 73–84. <https://doi.org/10.1024/1010-0652/a000005>
- Renger, S., Köller, M. M., & Möller, J. (2024). Was motiviert Schülerinnen und Schüler für das Lehramt?: Fragebogen zur Erfassung der Motivationen für die Berufswahl Lehramt bei Schülerinnen und Schülern (FEMOLA-S). *Zeitschrift für Pädagogische Psychologie*, 38(4), 245–259. <https://doi.org/10.1024/1010-0652/a000338>
- Schmid-Kühn, S. M., & Fuchs, T. (2024). Dropout in der Lehramtsausbildung und im Lehrkräfteberuf: Datenlage und Forschungsstand—Desiderata—Perspektiven. In S. M. Schmid-Kühn & T. Fuchs (Hrsg.), *Abbrüche, Ausstiege und andere Wege aus Lehramtsausbildung und Lehrerberuf: Erkenntnisse aus Wissenschaft und Praxis* (S. 14–28). Beltz Juventa. <https://doi.org/10.3262/978-3-7799-7635-6>
- Schreiber, M., Iller, M.-L., Gehbauer, M., Mäder, R., Asiedu Akrofi, A., Valieiev, Y., Düring, B., Leuenberger, A., & Rüschi, U. (2025, März). *Handbuch Fragebogen zur Erfassung des Motivprofils nach dem Zürcher Modell (MPZM-R)*. Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften. https://www.laufbahndiagnostik.ch/downloads/de/Handbuch_MPZM-R_Maerz_2025.pdf
- Stegmann, S., Dick, R. V., Ullrich, J., Charalambous, J., Menzel, B., Egold, N., & Wu, T. T.-C. (2010). Der Work Design Questionnaire: Vorstellung und erste Validierung einer deutschen Version. *Zeitschrift für Arbeits- und Organisationspsychologie A&O*, 54(1), 1–28. <https://doi.org/10.1026/0932-4089/a000002>
- Watt, H. M. G., Richardson, P. W., Klusmann, U., Kunter, M., Beyer, B., Trautwein, U., & Baumert, J. (2012). Motivations for choosing teaching as a career: An international comparison using the FIT-Choice scale. *Teaching and Teacher Education*, 28(6), 791–805. <https://doi.org/10.1016/j.tate.2012.03.003>

Artikel-Memory zum Klimawandel

- Förderung kritischer Informations- und Medienkompetenz im Physikunterricht -

Julia Hädrich*, Linus Bräumer*, Rita Wodzinski*

*Universität Kassel, AG Didaktik der Physik, Heinrich-Plett.-Straße 40, 34132 Kassel, Deutschland
haedrich@physik.uni-kassel.de

Kurzfassung

Ergebnisse aktueller Studien (ICILS, 2023) zeigen bei deutschen Schüler:innen einen signifikanten Rückgang computer- und informationsbezogener Kompetenzen wie die Suche nach Informationen und ihre sichere Bewertung, die für den Umgang mit der Informationsflut und Fehlinformationen im Internet notwendig sind. Das Dutch Media Competency Model des Netzwerk Mediawijsheid (2021) identifiziert und verknüpft zentrale Kompetenzen für einen effektiveren Medienumgang. Der Förderung dieser Kompetenzen im Physikunterricht widmet sich die Unterrichtsmethode des Artikel-Memorys. Die Lernenden setzen sich dabei selbstständig mit realen Artikeln zum Klimawandel auseinander. Über eine Konfrontation mit glaubwürdigen und unglaubwürdigen Inhalten werden sie für Fehlinformationen sensibilisiert. Auf dieser Grundlage identifizieren die Lernenden Kriterien, die eine Einschätzung der Glaubwürdigkeit ermöglichen, die dann in existierende Modelle zur Bewertung von Informationen eingebunden werden.

1. Ausgangssituation

Digitale Medien und das Internet offenbaren scheinbar unbegrenzte Möglichkeiten für seine Nutzer:innen, stellt sie aber auch vor immense Herausforderungen. Denn neben verifizierten und glaubwürdigen Inhalten zirkulieren im Internet auch fehlerhafte, irreführende und bewusst manipulierende Inhalte und Informationen, auch als Fake News oder Desinformation bezeichnet. Ohne Gatekeeper als klassische Instanz zur Sicherung der Glaubwürdigkeit fällt die Aufgabe der Einschätzung der Inhalte zunehmend auf das Individuum zurück (vgl. Höttecke & Allchin, 2020).

Auch Schüler:innen kommen bereits in jungen Jahren mit Fake News in Kontakt (vgl. Medienpädagogischer Forschungsverbund Südwest (mpfs), 2022).

Diese nicht überschaubare Informationsflut stellt Schüler:innen vor die immense Herausforderung, die Glaubwürdigkeit von Informationen selbstständig einzuschätzen. Viele Lernende sind für diese Herausforderung nach Ergebnissen aktueller Studien nicht gewappnet. Eine Sonderauswertung der PISA-Studie von 2022 zeigt, dass nur 47% der Befragten problemlos in der Lage sind, die Qualität von Informationen zu beurteilen (vgl. Kastorff et al., 2025). Auch im Rahmen der Studie ICILS 2023 konnte festgestellt werden, dass sich deutsche Schüler:innen im internationalen Vergleich durch ein eher niedriges mittleres Kompetenzniveau auszeichnen und mehr als 40% der Achtklässler nur über sehr geringe Fähigkeiten im kompetenten und reflektierten Umgang mit digitalen Medien und Informationen verfügen (vgl. Eickelmann et al., 2024). Ein angemessener Umgang mit Informationen im Internet und eine Förderung der

Media Literacy sollte somit zunehmend im Rahmen von Schule vermittelt werden.

Das Fach Physik erscheint dabei für das Erreichen dieser Ziele in besonderem Maße geeignet. Eine Vielzahl an Kontexten, die gesellschaftlich diskutiert werden und durch Desinformation belastet sind, wie Energie (z. B. Windenergie), Mobilität oder der Klimawandel lassen sich im Physikunterricht kontextualisieren. Zudem sind Physik und Naturwissenschaften insgesamt durch Wissenschaftsleugnung besonders belastet und bedürfen somit besonders der Reflexion von Informationen in diesen Kontexten.

2. Theoretischer Rahmen

2.1. Einschätzung von Informationen

Um einen Weg für Schüler:innen zu finden, die Glaubwürdigkeit von Informationen einzuschätzen, schlagen Höttecke und Allchin (2020) vor, sich am Vorgehen der in digitalen Medien wegfallenden Expert:innengruppen, wie Wissenschaftler:innen oder Journalist:innen zu orientieren (vgl. Höttecke & Allchin, 2020). Dabei lassen sich zwei grundlegende Strategien der Einschätzung identifizieren: der Bezug auf vorhandenes Hintergrundwissen oder ein Vertrauensurteil.

Die erste Strategie erlaubt eine Einschätzung der Glaubwürdigkeit von Informationen auf inhaltlicher Ebene, fordert jedoch ein hohes Maß fachlicher Kenntnisse zum Inhalt. Wenn Lernende auf Inhalte stoßen, die über ihre Expertise hinaus gehen, ist diese Strategie jedoch häufig nicht anwendbar. Es ist für sie geeigneter, auf das Vertrauensurteil zurückzugreifen (vgl. Zilz, 2022). Dabei werden Hintergrundinformationen abseits des Inhalt, wie die Autor:innen, das Medienformat oder die Webseite zu Rate gezogen,

um eine Einschätzung vornehmen zu können (vgl. ebd., 2022).

Um eine vereinfachte Handhabung solch eines Vertrauensurteils zu ermöglichen, können auf einfache Schlüsselwörter fokussierte, kriteriengeleitete Werkzeuge herangezogen. Ein solches Werkzeug ist der CRAAP-Test (Blakeslee, 2004), der sich besonders für die Einschätzung von Online-Artikeln und ähnlichen längeren textbasierten Formaten eignet. Als relevante Kriterien sind die Aktualität, Relevanz, Autorität, Genauigkeit und Absicht festgehalten, die zusätzlich mit Impulsfragen unterstützt werden. Wurde ein Inhalt anhand des CRAAP-Tests überprüft, liegen eine Reihe an Argumenten vor, die eine begründete Einschätzung der Glaubwürdigkeit dieses Inhalts zulassen (vgl. ebd., 2004).

2.2. Dutch Media Literacy Competency Model

Zentrale Kompetenzen, die für eine solche Einschätzung der Glaubwürdigkeit und einen kritisch-reflexiven Medienumgang notwendig sind, werden im Dutch Media Literacy Competency Model (Netzwerk Mediawijsheid, 2021) festgehalten.

Im Zentrum des Modells, welches in Abbildung 1 dargestellt ist, stehen die Nutzenden, die unter Verwendung verschiedener medien- und informationsbezogener Kompetenzen mit Informationen in unterschiedlichen Lebensbereichen interagieren.

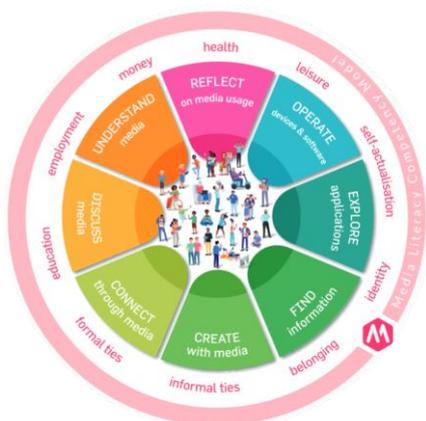


Abb. 1: Dutch Media Literacy Competency Model (Netzwerk Mediawijsheid, 2021, CC BY 4.0).

Die acht Kompetenzen für einen effektiven Medienumgang umfassen beispielsweise das Reflektieren des Medienumgangs und das Finden von Informationen, während es sich bei den insgesamt zehn benannten Lebensbereichen unter anderem um Schule und Ausbildung, Gesundheit oder Freundschaften als informellen Beziehungen handelt. Das Modell hält somit fest, dass das Vorgehen oder die Tiefe der Recherche von Informationen zu gesundheitlichen Themen anders sein kann als bei Bildungsthemen. Vorhandene Kompetenzen werden in Abhängigkeit von der Situation unterschiedlich stark eingefordert.

Das Modell strukturiert diese medienbezogenen Kompetenzen zusätzlich in fünf Niveaustufen, die

eine präzisere Einschätzung dahingehend erlauben, wie stark diese Fertigkeiten individuell ausgeprägt sind (vgl. ebd., 2021).

3. Das Artikel-Memory

Das Artikel-Memory beschreibt eine Unterrichtsmethode, die das Ziel verfolgt, im Rahmen des Physikunterrichts einen Beitrag zur Sensibilisierung für Fake News zu leisten und die Media Literacy zu fördern. Im Zentrum der Methode steht die selbstständige Auseinandersetzung der Lernenden mit realen Artikeln. Durch das Kontrastieren glaubwürdiger und unglaubwürdiger Inhalte identifizieren die Lernenden Kriterien, die eine begründete Einschätzung der Glaubwürdigkeit ermöglichen z. B. hinsichtlich der/des Autor:in oder der Aktualität.

Die Methode ist auf eine Doppelstunde ausgelegt und lässt sich mit dem Kontext Klimawandel in der Wärmelehre der 7. oder 8. Klasse verorten. Die Schüler:innen erweitern mithilfe des Artikel-Memorys ihre Kompetenzen im Bereich der Bewertung, indem sie anhand der kontrastierenden Artikel zwischen eher glaubwürdigen und eher unglaubwürdigen Inhalten kriteriengeleitet unterscheiden. Des Weiteren können die Kompetenzen im Bereich der Kommunikation und speziell der Arbeit mit Quellen fördern, indem sie die zusätzliche Informationen zu den präsentierten Artikelausschnitten problembezogen recherchieren und die Ergebnisse im Anschluss kommunizieren. Auch die Lesekompetenz kann durch die Arbeit an den verschiedenen Artikeln gefördert werden. Im Folgenden wird das Unterrichtsvorgehen phasenweise dargestellt. Die folgende Unterrichtsstruktur stellt eine Überarbeitung des gleichnamigen Unterrichtskonzept von Hädrich & Wodzinski (2024) dar.

3.1. Unterrichtseinstieg

Zur Motivation der Auseinandersetzung werden aktuelle Nachrichten und fehlerhafte Meinungen zum Klimawandel präsentiert. Besonders im Winter verbreiten sich immer wieder scheinbare Beweise gegen die Existenz der Erderwärmung auf sozialen Netzwerken. Fake News und entsprechende Korrekturen lassen sich verschiedener Faktencheck-Webseiten entnehmen, wie z. B. CORRECTIV.org oder der ARD-Faktenfinder.

3.2. Artikel-Memory I

Die erste Arbeitsphase der Methode verfolgt das Ziel, die Lernenden für Fake News und Desinformation zu sensibilisieren. Im Sinne einer ersten Problematisierung werden, anknüpfend an die Beispiele aus dem Einstieg, weitere gegensätzliche Aussagen von beispielsweise Politikern präsentiert. Dies zeigt den Lernenden die Kontroversität des Themas und wirft die Frage auf, welcher Person – und allgemeiner welcher Information – im Internet vertraut werden kann.

Mit dieser Erkenntnis geht es nun in eine Erarbeitungsphase, in der die Schüler:innen in Kleingruppen die Texte verschiedener Artikel zum Thema

Klimawandel erhalten. Ihre Aufgabe ist es, die Artikel hinsichtlich ihrer Glaubwürdigkeit auf der Notenskala zu bewerten und Gründe für die gegebene Bewertung anzugeben. Die Begründung wird den Lernenden dabei in der Regel nicht leicht fallen. Zur Unterstützung der Gruppen teilt die Lehrkraft nun Kärtchen aus, die mit den Webseiten der Artikel bedruckt sind. Die Aufgabe ist, diese Webseiten wie in einem Memory-Spiel ihren Artikeltexten zuzuordnen. Das Ziel ist dabei jedoch keineswegs die richtige Zuordnung, da dies bei den Lernenden nicht anzunehmen ist. Vielmehr soll festgestellt werden, dass es neben dem Inhalt mehr Webseitenelemente gibt, die untersucht werden und Aufschluss über die Glaubwürdigkeit geben können.

Zum Abschluss der Sensibilisierungsphase werden die Zuordnungen der Webseiten und mögliche Unterschiede zwischen den Kleingruppen diskutiert. Zudem sollen die Lernenden reflektieren, worin die Schwierigkeiten bei dieser Einschätzung lagen. Insgesamt wird in dieser Phase somit herausgearbeitet, dass der Wissenstand der Lernenden zu diesem Zeitpunkt nicht ausreicht, eine zufriedenstellende begründete Einschätzung abzugeben.

3.3. Artikel-Memory II

In der zweiten Erarbeitungsphase sollen Kriterien zur Einschätzung von Informationen identifiziert werden. Als Motivation dienen die Erkenntnisse aus der vorherigen Phase, dass diese Einschätzung von Informationen sehr komplex ist und die aktuellen Kenntnisse der Lernenden diesbezüglich unzureichend sind. Es konnte zudem festgestellt werden, dass der Artikelinhalt für die Schüler:innen kein eindeutiges Kriterium sein kann und stattdessen andere Hintergrundinformationen, wie die Webseite, Indizien zur Glaubwürdigkeit liefern können. Durch eine selbstständige Internetrecherche können die Schüler:innen weitere Hintergrundinformationen, wie das Veröffentlichungsdatum oder Informationen zum Ruf der Webseite finden. Diese Unterrichtsphase schließt mit dem Vergleich der Suchergebnisse zu den verschiedenen Artikeln und der Sammlung der identifizierten Einschätzungskriterien.

3.4. Vertiefung

In der letzten Phase des Artikel-Memorys werden die gefundenen Kriterien in ein existierendes Modell zur Einschätzung der Glaubwürdigkeit eingebunden, dem CRAAP-Test von Blakeslee (2004). Mithilfe des CRAAP-Tests kann die Vielzahl der Kriterien auf fünf Schlagwörter, welche in Tabelle 1 aufgeführt sind, reduziert werden. Dies kann die Einschätzung von Informationen vereinfachen, was eine zukünftige Anwendung der Überprüfung von Informationen unterstützt.

Tab. 1: Schlüsselwörter des CRAAP-Tests (Blakeslee, 2004).

Abkürzung	Schlüsselwort
C	Currency – Aktualität
R	Relevance – Relevanz
A	Authority – Autorität
A	Accuracy – Genauigkeit
P	Purpose – Absicht/Zweck

3.5. Weitere Hinweise

Die Anzahl der verwendeten Artikel lässt sich in Abhängigkeit des Leistungsniveaus der Klasse variieren. Für einen direkten Vergleich sollte jedoch jeweils mindestens ein glaubwürdiger und unglaubwürdiger Artikel verwendet werden. Es kann auch ein satirischer Text ergänzt werden. Diese Texte haben nicht die Absicht zu (des-)informieren, sondern dienen lediglich der Unterhaltung, was somit nicht hinsichtlich der Glaubwürdigkeit gewertet werden kann und sollte.

In der Form, in der das Artikel-Memory mit Lehrkräften besprochen und letztendlich erprobt wurde, wurden fünf Artikel verwendet. Diese setzten sich aus je zwei glaubwürdigen und unglaubwürdigen Artikeln, als auch einem Satire-Text zusammen.

4. Ergebnisse einer Unterrichtserprobung

Die Methode des Artikel-Memorys wurde im Rahmen zweier studentischer Abschlussarbeiten untersucht.

4.1. Qualitative Interviewstudie 04/2022

Im Rahmen von ca. 30-minütigen Interviews sollten drei Fragen geklärt werden:

- Wie schätzen die Lehrkräfte die Relevanz des Themas „kritisches Denken“ für die Lernenden ein und inwieweit bietet der Physikunterricht dafür einen passenden Rahmen?
- Inwiefern können die Lernziele und die Förderung des kritischen Denkens mithilfe der vorliegenden Unterrichtsidee erreicht werden?
- Inwieweit eignet sich der Kontext Klimawandel als Rahmung des Artikel-Memorys in der siebten Klasse diskutiert?

Die Lehrkräfte schätzen die medienbezogenen Kompetenzen der Lernenden in der Regel gering ein, weshalb sie dem Thema der Media Literacy und dem Umgang mit Informationen eine enorme Relevanz zusprechen. Sie geben jedoch auch an, dass das Interesse seitens der Lernenden stark von deren Betroffenheit abhängt. Weiterhin könnten die Lehrkräfte beobachten, dass eine positive Entwicklung der Kompetenzen mit steigender Klassenstufe beobachtbar ist.

Die Lehrkräfte geben an, dass der Physikunterricht für die Förderung der Media Literacy geeignet ist.

Auch die Lernziele werden als geeignet gewählt eingeschätzt, können jedoch auch hinsichtlich der Sozialkompetenz ergänzt werden. So kann die Auseinandersetzung mit gesellschaftlich kontroversen Themen die Kompetenzen der Lernenden hinsichtlich der Teamfähigkeit und Kooperation fördern. Die Lehrkräfte weisen darauf hin, dass die Entwicklung der Media Literacy von den verschiedenen Ausgangspunkten der Lernenden abhängt und der Umgang mit familiär verankerten kognitiven Verzerrungen berücksichtigt werden muss.

Abschließend wurde seitens der Lehrkräfte zurückgemeldet, dass sich der Klimawandel zur Kontextualisierung anbietet. Sie räumen aber ein, dass die Komplexität der Artikel in der gewählten Klassenstufe eine Herausforderung darstellen kann.

4.2. Unterrichtserprobung 04/2024

An die Ergebnisse der Interviewstudie anknüpfend wurde die Unterrichtsmethode in der dargestellten Struktur im Physikunterricht einer 8. Klasse eines hessischen Gymnasiums (N=25; Alter=13,96 (SD=0,62)) erprobt. Zur Erfassung der potenziellen Förderung der Media Literacy durch die Methode wurde ein Fragebogen konzipiert, der vor und direkt nach der Intervention von den Lernenden bearbeitet wurde. Innerhalb des Fragebogens erhalten die Schüler:innen die Aufgabe, verschiedene Aussagen über zwei Artikel zum Thema CO₂-Ausgleich auf einer 5-stufigen Likert-Skala zu bewerten. Ähnlich zum Vorgehen im Unterricht, werden sie mit einem glaubwürdigen und unglaubwürdigen Artikeltext konfrontiert. Der unglaubwürdige Artikel einer Gasfirma zeichnet sich dabei unter anderem durch potenzielles Greenwashing aus.

Die Lernenden schätzen unter anderem ein, wie glaubwürdig ihnen die getroffenen Aussagen erscheinen und inwiefern sie den Inhalt weiterempfehlen würden. Die Aussagen, zu denen sich die Lernenden im Fragebogen äußern sollen, bilden dabei verschiedene Teilkompetenzen ab, die im Dutch Media Literacy Model wiederzufinden sind. Im Post-Fragebogen wurden zusätzliche Items zur Evaluation der Methode des Artikel-Memories ergänzt.

Signifikante Effekte bleiben aufgrund der geringen Stichprobe weitgehend aus. Anhand einzelner Items lässt sich jedoch eine Veränderung der Media Literacy der Lernenden beobachten. Im Vergleich vertrauen die Lernenden dem unglaubwürdigen Artikel nach der Intervention weniger ($d_{\text{cohens}} = -0,96$). Andererseits schreiben sie dem glaubwürdigen Artikel einen höheren Wahrheitsgehalt zu ($d_{\text{cohens}} = 0,82$). Beide Entwicklungen deuten darauf hin, dass die Lernenden besonders die Aspekte „Autorität“, hier die Webseite auf der der Inhalt publiziert wurde, und „Absicht“ besser identifizieren und geeignet einschätzen können.

Die Ergebnisse des Post-Tests zeigen weiterhin, dass die Unterrichtsstunde insgesamt als interessant und motivierend eingeschätzt wurde.

Ergänzend zu den Daten des Fragebogens liefern Beobachtungen der Unterrichtserprobung, eine Nachbesprechung mit der Klasse und eine Interview mit der regulären Lehrperson zusätzliche qualitative Daten darüber, wie die Stunde zum Artikel-Memory seitens der Schüler:innen und der Lehrkraft wahrgenommen wurde. Aus dem Unterrichtsgespräch und Aussagen der Lehrperson lässt sich erkennen, dass die Lernenden insgesamt Schwierigkeiten mit dem Begriff der Glaubwürdigkeit haben und er noch nicht geeignet erfasst werden kann. Dies kann auch der Grund dafür sein, dass die Lernenden den Artikeln Glaubwürdigkeit eher intuitiv zuschreiben und Begründungen weitgehend ausbleiben. Weiterhin stellt die Reflexion verwendeter Fachbegriffe und Fremdwörter eine Herausforderung dar. Die Verwendung vieler unbekannter Fachbegriffe ist für viele Lernende ein direkter Beleg für Glaubwürdigkeit.

Die Autor:innen scheinen für die Lernenden jedoch eine besondere Rolle in der Einschätzung von Inhalten zu haben. Die Bedeutung dieser erkennen die Schüler:innen durchaus und legen selbstständig einen großen Wert auf diese Information.

Im Rahmen der Unterrichtsstunde und der Nachbesprechung eine Woche später zeigte sich, dass die Schüler:innen die Aspekte des CRAAP-Tests selbstständig erfassen und in diesem zeitlichen Rahmen auch behalten konnten.

Das Interview mit der Lehrkraft konnte die Ergebnisse aus der ursprünglichen Interviewstudie bestätigen. Die Lehrkraft weist jedoch darauf hin, dass das Niveau der Artikel für die Lerngruppe in einigen Teilen zu anspruchsvoll war. Die Lehrkraft betont die Relevanz der Media Literacy und sieht in der Betrachtung von Diagrammen und Temperaturentwicklungen im Rahmen des Artikel-Memories großes Potential. Dies könnte auch den Inhalt vereinfachen und für andere Leistungsniveaus greifbarer machen.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Die Ergebnisse der beiden Erhebungen deuten auf eine positive Entwicklung der Media Literacy der Lernenden hin und weisen auf eine geeignete Rahmung für die Förderung dieser Kompetenzen durch die Unterrichtsmethode des Artikel-Memories hin.

Die Untersuchung kann auf Grundlage der entwickelten Pre-Post-Tests mit größerer Stichprobe wiederholt werden, um die Ergebnisse weiter auszuscharfen. Dabei sollte besonders die Komplexität der ausgewählten Artikel berücksichtigt werden.

Auch andere Kontexte, die gesellschaftlich diskutiert werden, wie die Schäden und Nutzen der Windenergie, lassen sich im Fach Physik einbetten und einen Rahmen für die Methode bieten. Untersuchungen der Methode an solchen Kontexten erscheint gewinnbringend.

6. Literatur

- Blakeslee, S. (2004). The CRAAP Test. *LOEX Quarterly*, 31(3). Verfügbar unter: <https://commons.emich.edu/loexquarterly/vol31/iss3/4>
- Eickelmann, B., Casamassima, G., Drossel, K. & Fröhlich, N. (2024). ICILS 2023 im Überblick. Zentrale Ergebnisse, Entwicklungen über ein Jahrzehnt und mögliche Entwicklungsperspektiven. Münster, New York: Waxmann.
- Hädrich, J. & Wodzinski, R. (2024). Kritisches Denken fördern – Artikel-Memory zum Klimawandel. In H. (van Vorst (Hrsg.), Frühe naturwissenschaftliche Bildung. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik Jahrestagung in Hamburg 2023 (Bd. 44, S. 330–333). Essen: Universität Duisburg-Essen.
- Hessisches Kultusministerium (Hrsg.). (2011). Bildungsstandards und Inhaltsfelder; Das neue Kerncurriculum für Hessen; Sekundarstufe I – Gymnasium. Physik. Wiesbaden. Verfügbar unter: <https://kultusministerium.hessen.de/Unterricht/Sekundarstufe-I-Kerncurricula>
- Höttecke, D. & Allchin, D. (2020). Reconceptualizing nature-of-science education in the age of social media. *Science Education*, 104(4), 641–666. <https://doi.org/10.1002/sce.21575>
- Kastorff, T., Müller, M., Selva, C., Greiff, S. & Moser, S. (2025). Fake News oder Fakten? Wie Jugendliche ihre digitale Informationskompetenz einschätzen und welche Rolle Schulen und Lehrkräfte dabei spielen Erkenntnisse aus PISA 2022 (1. Auflage). Münster: Waxmann.
- Medienpädagogischer Forschungsverbund Südwest (Hrsg.). (2022). JIMplus 2022. Fake News und Hatespeech. Verfügbar unter: https://www.mpfs.de/fileadmin/files/Studien/JIM/JIMplus_2022/JIMplus_Charts_2022_fuer_Website_pdf.pdf
- Netwerk Mediawijsheid (Hrsg.). (2021). The Dutch Media Literacy Competency Model 2021. Verfügbar über: <https://netwerkmediawijsheid.nl/over-ons/about-dutch-media-literacy-network/>.
- Zilz, K. (2022). Wer ist vertrauenswürdig? In: *Naturwissenschaften im Unterricht Chemie. Nature of Science*, 2022(192), 16–21.

Abbildungsnachweis

- Netwerk Mediawijsheid / Dutch Media Literacy Competency Model 2021 / <https://netwerkmediawijsheid.nl/kennis-tools/competentiemodel/> / CC BY 4.0 (Zugriff am 20.10.2025)

Binnendifferenziertes Experimentieren zur Förderung der Variablenkontrollstrategie im Unterricht

Tobias Winkens, Nicolas Hartrumpf, Heidrun Heinke

I. Physikalisches Institut IA, RWTH Aachen University
Sommerfeldstraße 14, 52074 Aachen
winkens@physik.rwth-aachen.de

Kurzfassung

Der Beitrag fokussiert auf das Experimentieren unter Anwendung der Variablenkontrollstrategie (VKS) mit einem expliziten binnendifferenzierten Förderansatz. Als unterrichtstauglicher Ansatz berücksichtigt er das Vorwissen der Lernenden als Ausgangslage und baut darauf Lerngelegenheiten auf. Die theoretische Basis bilden die vier aus der Literatur bekannten VKS-Teilfähigkeiten zur Interpretation (IN), Identifikation (ID) und Planung (PL) kontrollierter Experimente sowie das Verständnis der fehlenden Aussagekraft konfundierter Experimente (UN). Mithilfe teilfähigkeitsspezifischer Arbeitsblattvorlagen werden Experimente zur VKS implementiert, sodass zu jedem Experiment vier Arbeitsblattversionen mit unterschiedlichem Schwierigkeitsgrad erzeugt werden können. Damit wurden zwei Lernzirkel mit fünf gleichen experimentellen Aufbauten, aber verschiedenen Anleitungen zusammengestellt. Ein Lernzirkel adressiert vorwiegend die einfachen Teilfähigkeiten (2xIN, 2xID, 1xPL) und ein anderer ausschließlich die schweren Teilfähigkeiten (3xPL, 2xUN). In einer ersten Studie (N = 87) in drei gymnasialen 7. Klassen wurden die Schüler:innen gemäß ihrer Pre-Test-Ergebnisse in leistungshomogene Kleingruppen von 2-3 Schüler:innen eingeteilt und durchliefen in diesen eine Intervention aus einer Einführung, der Lernzirkeldurchführung sowie einer Sicherungsphase und absolvierten zum Abschluss den Post-Test. Die Ergebnisse dieser Erhebung werden in diesem Beitrag vorgestellt.

1. Motivation

Im Zuge einer wachsenden Heterogenität schulischer Lerngruppen wird es eine zunehmend wichtige Aufgabe des naturwissenschaftlichen Unterrichts und damit auch des Physikunterrichts, das individuelle Vorwissen der Schüler:innen beim Kompetenzerwerb zu berücksichtigen. Das gilt insbesondere auch für die explizite Förderung experimenteller Kompetenzen. Am Beispiel der Variablenkontrollstrategie (VKS) soll daher ein binnendifferenzierender Ansatz zur Förderung der VKS im (Physik-)Unterricht vorgestellt und ein Einblick in eine erste Erhebung zur Wirksamkeit dieses Ansatzes gegeben werden. Die VKS lässt sich dabei mit der Identifikation kontrollierter Experimente (ID), der Interpretation der Befunde kontrollierter Experimente (IN) sowie der Planung kontrollierter Experimente (PL) und dem Verständnis der fehlenden Aussagekraft konfundierter Experimente (UN¹) in vier Teilfähigkeiten (TF) einteilen (vgl. Chen & Klahr, 1999; Schwichow et al., 2016; Schwichow & Nehring, 2018). Die Teilfähigkeiten sind dabei als unterschiedlich schwierig zu bewerten, mit ID und IN als leichteste und UN als schwierigste Teilfähigkeit. Eine Übersicht zur

Schwierigkeit findet sich als Fazit aus einigen Studien in Winkens und Heinke (2023a).

Fördermöglichkeiten zur VKS sind bereits vielfach erprobt (u.a. vgl. Bohrmann, 2017; Brandenburger & Mikelskis-Seifert, 2019; Brandenburger et al., 2022; Peteranderl & Edelsbrunner, 2020; Goertz, 2022; Schwichow et al., 2015a; Schwichow et al., 2015b; Schwichow et al., 2016a; Schwichow et al., 2016b; Zohar & David, 2008). In diesen Quellen wurde teilweise bereits über unterschiedliche Wirkungen der Interventionen bei leistungsschwächeren und -stärkeren Schüler:innen berichtet, jedoch wurden die Interventionsmaßnahmen nicht auf Basis des Vorwissens angeboten. Durch die theoretische Unterteilung in vier Teilfähigkeiten mit unterschiedlichen Schwierigkeitsgraden bietet die VKS einen idealen Ansatzpunkt, ein binnendifferenziertes Experimentieren zur Förderung experimenteller Kompetenzen zu untersuchen. Dies erscheint auch deshalb interessant, weil zurzeit noch unklar ist, für welche Schüler:innen-Teilgruppen Differenzierungsmaßnahmen besonders hilfreich sind (u.a. vgl. Wodzinski, 2016; Güth, 2023; Peteranderl et al., 2023).

¹ Abgeleitet vom engl. understanding (vgl. Schwichow & Nehring, 2018).

2. Teilfähigkeitsspezifische Arbeitsblattvorlagen zur VKS

Für das Verständnis der hier vorgestellten Erhebung sind zwei Vorarbeiten essentiell, die nachfolgend kurz beschrieben werden sollen. Dies betrifft neben einer für diese Erhebung grundlegenden Studie von Goertz (2022) (s. Abschnitt 3.2), deren Ergebnisse für einen Vergleich herangezogen werden, vor allem die Entwicklung teilfähigkeitsspezifischer Arbeitsblattvorlagen zur VKS, die im Folgenden umrissen werden soll.

Auf Basis der VKS-Teilfähigkeiten sind vier teilfähigkeitsspezifische Arbeitsblattvorlagen entwickelt worden, wobei für jede Teilfähigkeit eine Vorlage existiert (vgl. Winkens & Heinke, 2024; Winkens et al., 2024). Als Grundlage für die Entwicklung der Vorlagen dienten fünf erprobte und wirksame Lernzirkelmodule zur Förderung der VKS der Plattform FLexKom² (Fördern und Lernen experimenteller Kompetenzen), deren Schwerpunkte jeweils auf einer der verschiedenen Teilfähigkeiten lag (vgl. Goertz, 2022). Diese sind in der untersten Zeile von Tabelle 1 dargestellt. Die Arbeitsblattvorlagen greifen charakteristische Elemente zur Förderung der jeweiligen Teilfähigkeit auf. Über Variablenplatzhalter können die experimentenspezifischen Variablen angepasst und auf diese Weise in die Vorlagen implementiert werden. Für die hier vorgestellte Studie sind die Vorlagen unerlässlich, um die vorhandenen Module mitsamt ihrer Experimente an die Vermittlung anderer Teilfähigkeiten anzupassen und damit die Intervention in der Studie dem Bedarf entsprechend auszugestalten (Genauerer siehe Tabelle 1 und Abschnitt 3.4). Insgesamt ermöglichen die Arbeitsblattvorlagen, dass die Schüler:innen an den gleichen experimentellen Aufbauten mit verschiedenen Anleitungen arbeiten, die unterschiedliche Teilfähigkeiten der VKS und damit verschiedene Kompetenzniveaus adressieren.

3. Erste Erhebung zum binnendifferenzierenden Förderansatz zur VKS

3.1. Studiendesign

Das Studiendesign wurde in Anlehnung an eine vorangegangene Studie gewählt (vgl. Goertz, 2022, S.202-205 & S.293f.), auch weil das die Vergleichbarkeit der neu aufgenommenen Daten mit den Ergebnissen der früheren Studie sichert. Dieses basiert gemäß Abbildung 1 auf einem Pre-Post-Test-Design mit einer dazwischen stattfindenden Intervention. Für die Intervention werden die Proband:innen auf Basis ihrer Pre-Test-Ergebnisse in leistungshomogene Kleingruppen eingeteilt und zudem zwei verschiedenen Lernzirkeln zugeordnet, wobei der Typ A-Lernzirkel als einfacher und der Typ B-Lernzirkel als schwerer anzusehen sind. Die genaue Gestaltung der Lernzirkel wird in Abschnitt 3.4 beschrieben.

Als Testinstrument zur Erfassung der VKS-Fähigkeiten dient das von Goertz (2022) verwendete Testinstrument zur VKS als Basis. Dieses beinhaltet 11 Items des Control-of-Variables Strategy Inventory (CVSI) (vgl. Schwichow et al., 2016), davon je drei zu den Teilfähigkeiten IN, ID und UN sowie zwei zur Teilfähigkeit PL (vgl. Goertz, 2022, S.223). In der hier eingesetzten Version wurde die Anzahl der Antwortoptionen für die ID-Items von vier auf sechs erhöht (vgl. Winkens & Heinke, 2023b). Außerdem wurden zwei schwerere UN-Items zusätzlich ergänzt, um potentiellen Deckeneffekten bei den leistungsstarken Proband:innen vorzubeugen (vgl. Goertz, 2022, S.348). Das verwendete VKS-Testinstrument besteht folglich aus 13 Items (3xIN, 3x ID, 2xPL, 5xUN).

Zusätzlich zu den VKS-Items wurden weitere Ko-Variablen (u.a. Noten und Selbstkonzept) erhoben. Diese werden aber hier nicht weiter betrachtet.

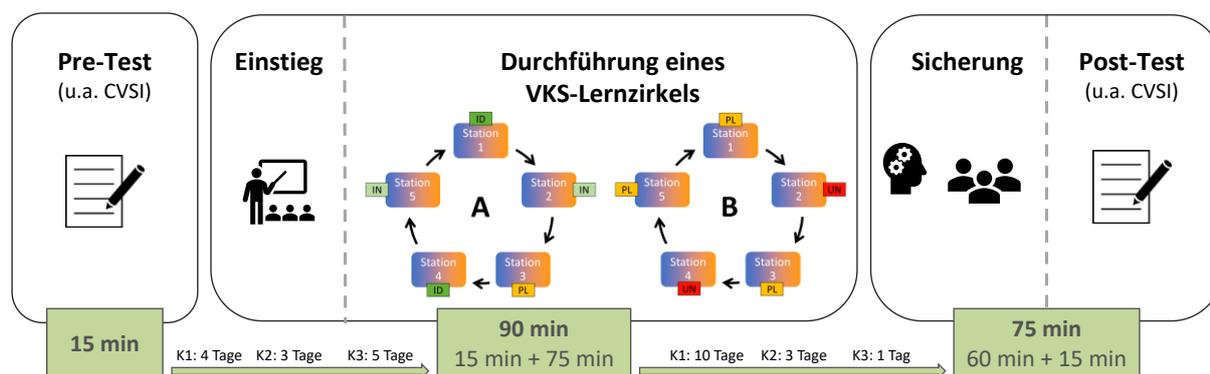


Abb. 1: Ablauf des Studiendesigns bestehend aus Pre-Test, Intervention und Post-Test über drei Tage verteilt. Der zeitliche Abstand zwischen den Tagen ist für die drei Klassen (K1-K3) dargestellt. Quelle: Eigene Darstellung angelehnt an Goertz, 2022, S.293.

² Die Plattform FLexKom ist über die Website des Lernlabors SCiPhyLAB der RWTH Aachen University erreichbar unter: <https://sciphylab.de/flexkom/> (Stand: 15.5.2025)

Tab. 1: Übersicht über die verwendeten Lernzirkelstationen mit den aufgeführten Experimenten. Für die beiden Lernzirkelversionen Typ A und Typ B wurden bis auf Station 3 jeweils Arbeitsblattvarianten für eine andere Teilfähigkeit verwendet. Die Farbcodierung weist auf die Schwierigkeit der Teilfähigkeiten von grün (einfacher als PL) bis rot (schwerer als PL) hin. Zum Vergleich ist der VKS-Lernzirkel bei Goertz (2022) gezeigt. Quelle: Eigene Darstellung.

Lernzirkel	Station 1: Elektromagnet	Station 2: Fadenpendel	Station 3: Federpendel	Station 4: Drahtwiderstand	Station 5: schiefe Ebene
Typ A	ID	IN	PL	ID	IN
Typ B	PL	UN	PL	UN	PL
Goertz (2022)	ID	UN	PL	UN	IN

3.2. Ergebnisse einer früheren Studie

Im Rahmen seines Promotionsvorhabens hat Goertz unter anderem einen Lernzirkel zur Förderung der VKS in der Mittelstufe entwickelt und evaluiert (N = 443) (Goertz, 2022). Dieser Lernzirkel bestand aus fünf Stationen, die jeweils unterschiedliche Teilfähigkeiten (2xUN, 1xPL, 1xIN, 1xID) als Schwerpunkt fokussiert haben, wie in Tabelle 1 zu sehen ist (vgl. Goertz, 2022, S.184). Die Proband:innen haben den Lernzirkel in einem Studiensetting ähnlich zu Abbildung 1 durchgeführt. Dabei waren sie in zufällig zusammengesetzte und damit leistungsheterogene Kleingruppen von 2-3 Schüler:innen aufgeteilt.

Der hier untersuchte differenzierende Ansatz nimmt leistungshomogene Kleingruppen in den Blick. Da die Ergebnisse von Goertz (2022) im Hinblick auf das VKS-Instrument unter anderem getrennt für leistungsschwache und leistungsstarke Schüler:innen ausgewertet wurden, eignen sich diese als Vergleichsdaten für die Schüler:innen in den hier untersuchten leistungshomogenen Gruppen. Die Kategorisierung erfolgte bei Goertz, indem Schüler:innen, die zu dem unteren Drittel der Stichprobe gemäß der Pre-Test-Ergebnisse³ gehörten, der leistungsschwachen Teilgruppe zugeordnet wurden. Die leistungsstarke Teilgruppe ergibt sich analog aus den Schüler:innen aus dem oberen Drittel der Pre-Test-Ergebnisse.

Tab. 2: Effektstärken für den Wissenszuwachs bzgl. der VKS-Skalen nach Durchlaufen eines VKS-Lernzirkels in der Studie von Goertz (2022), aufgeteilt für leistungsschwache und leistungsstarke Schüler:innen (Details siehe Text). Quelle: Eigene Darstellung nach Goertz, 2022, S.326.

Relevante Pre-Post-Ergebnisse von Goertz (2022)		
Skala	leistungsschwache Schüler:innen	leistungsstarke Schüler:innen
ID_IN	d = 1,53	d = 0,57* *Deckeneffekte
PL_UN	d = 1,59	d = 1,39
VKS_ges	d = 1,72	d = 1,29

³ Maßgeblich für die Einteilung waren nicht nur die Ergebnisse der VKS-Items, sondern ein Gesamtscore, der zusätzlich auch die

In Tabelle 2 sind die Effektstärken des VKS-Tests im Pre-Post-Vergleich abgebildet (Zeile VKS_ges). Zusätzlich wurden die VKS-Items auf Basis einer Faktorenanalyse in eine leichtere (ID_IN) und schwere Teilskala (PL_UN) aufgeteilt (vgl. Goertz, 2022, S.265f.). Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 zusätzlich aufgeführt. Im nicht binnendifferenzierten Setting von Goertz zeigen sich dabei große Lerneffekte für beide Teilgruppen. Der beobachtete Unterschied in den Effektstärken für die Skala ID_IN zugunsten der Gruppe der leistungsschwächeren Schüler:innen kann aufgrund dominanter Deckeneffekte bei den leistungsstärkeren Schüler:innen nicht sinnvoll interpretiert werden (vgl. Goertz, 2022, S.331).

3.3. Rahmenbedingungen der aktuellen Studie

Die Stichprobe umfasste N = 87 Proband:innen aus drei 7. Klassen (K1-K3) eines Gymnasiums mit einem Durchschnittsalter von 12,9 Jahren. Stattgefunden hat die Erhebung am Schuljahresende im Rahmen des regulären Physik- bzw. Mathematikunterrichts. Die Erhebung wurde zur Umsetzung des beschriebenen Studiendesigns (vgl. Abbildung 1) an drei verschiedenen Schultagen durchgeführt. Am ersten Tag fand der Pre-Test im Umfang von ca. 15 Minuten am Ende einer Stunde statt. Die Durchführung der beiden Lernzirkelversionen, denen die Schüler:innen auf Basis ihrer Pre-Test-Ergebnisse zugeordnet wurden, erfolgte mit einem vorangeschalteten Einstieg innerhalb einer 90-minütigen Doppelstunde. Die Sicherungsphase erfolgte an einem dritten Tag vor dem abschließenden Post-Test, wofür insgesamt der Großteil einer weiteren Doppelstunde verwendet wurde.

Durch die Durchführung im Schulalltag an drei verschiedenen Tagen war die Studie mit einer relativ hohen Drop-Out-Quote über die verschiedenen Studientage hinweg verbunden. Konkret haben 27 Schüler:innen nicht an allen Tagen an den verschiedenen Bestandteilen der Studie teilgenommen. Für die Betrachtung der Ergebnisse in Abschnitt 4 werden nur N = 60 Proband:innen berücksichtigt, die zu allen drei Zeitpunkten teilgenommen haben.

3.4. Gestaltung der Intervention

Die Intervention zur Förderung der Variablenkontrollstrategie (VKS) zwischen dem Pre- und Post-Test

Ergebnisse des MeK-LSA-Tests (vgl. Theyßen et al., 2016) berücksichtigt hat (vgl. Goertz, 2022, S.323f.).

besteht aus drei Teilen – einem Einstieg, einer Lernzirkeldurchführung und einer Sicherungsphase. Wie im Abschnitt 3.1 erwähnt, baut das Studiensetting auf den Vorarbeiten von Goertz (2022) auf, weshalb die Einstiegs- bzw. Motivationsphase sowie die abschließende Sicherungsphase an der Stelle nicht weiter beschrieben werden und auf die dortigen Ausführungen verwiesen wird (vgl. Goertz, 2022, S.205-207). Bei der Lernzirkeldurchführung werden zwei Lernzirkeltypen mit fünf Stationen verwendet. Besonderheit war, dass in beiden Lernzirkeltypen die gleichen experimentellen Aufbauten verwendet wurden, aber Anleitungen in Form unterschiedlicher Arbeitsblätter bereitgestellt wurden. Dazu wurde auf die in Abschnitt 2 beschriebenen teilfähigkeitsspezifischen Arbeitsblattvorlagen zur VKS zurückgegriffen. Wie in Tabelle 1 zu sehen ist, adressiert der Typ A-Lernzirkel vorwiegend die einfachen Teilfähigkeiten (2xIN, 2xID, 1xPL) und der Typ B ausschließlich die schweren Teilfähigkeiten (3xPL, 2xUN). Die Bearbeitungszeit beträgt 15 Minuten pro Station, die eigenständig von den Proband:innen bearbeitet werden können (vgl. Goertz, 2022, S.206).

3.5. Forschungsfrage

Im Hinblick auf den hier beschriebenen Ansatz zu einer differenzierten Förderung der VKS ergibt sich u.a. die folgende Forschungsfrage (FF).

- FF: Wie ändert sich das VKS-Verständnis nach dem Bearbeiten eines auf Basis der Pre-Test-Ergebnisse zugeordneten Lernzirkeltyps?

Auf Basis der Untersuchungsergebnisse der vorangegangenen Studie von Goertz (2022) zur Förderung der VKS in einem ähnlichen Setting lassen sich unter Berücksichtigung des neuen Differenzierungsansatzes folgende Hypothesen zur FF ableiten.

- H.1: Das Verständnis der VKS verbessert sich allgemein signifikant.
- H.2: Das Verständnis der jeweils im Lernzirkel behandelten Teilfähigkeiten der VKS erhöht sich besonders stark.

4. Erste Ergebnisse

In der hier vorgestellten Studie ist der binnendifferenzierende Ansatz zur Förderung der VKS erstmals unter realen schulischen Bedingungen getestet und untersucht worden. In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse und Erkenntnisse daraus vorgestellt und diskutiert.

4.1. Lernzirkelzuteilung nach Pre-Testung

Wesentlicher Bestandteil des Studiendesigns ist, dass die Proband:innen vor der Intervention auf Basis ihrer Pre-Test-Ergebnisse einem der beiden Lernzirkeltypen zugeteilt wurden. Dadurch sollen die Proband:innen auf ihr individuelles Kompetenzniveau ausgerichtetes Lerngelegenheiten erhalten.

In Tabelle 3 ist die Einteilung der drei Testklassen (K1-K3) in Gruppen zu sehen, die mit dem leichteren

Typ A- und dem schweren Typ B-Lernzirkel gearbeitet haben. Die Einteilung erfolgte nach Auswertung der Pre-Test-Ergebnisse im Allgemeinen nach der Zuteilungsregel, dass Proband:innen bei richtiger Beantwortung von mindestens fünf der sechs leichten Items des VKS-Tests (je 3xID und 3xIN) dem Typ B-Lernzirkel zugeordnet wurden, sonst dem Typ A.

Tab. 3: Übersicht über die nach dem Pre-Test erfolgte Einteilung der Klassen K1 bis K3 in Gruppen, die mit dem Typ A- und Typ B-Lernzirkel gearbeitet haben, sowie die in der Auswertung berücksichtigten Datensätze. Quelle: Eigene Darstellung.

	Typ A	Typ B
K1	11	9
K2	14	15
K3	19	6
Σ_{Pre}	44	30
Anwesenheit beim Pre- & Post-Test und Lernzirkel		
$\Sigma_{Pre+LZ+Post}$	35	25

Wie in Tabelle 3 zu sehen ist, waren in den Klassen K1 und K3 überwiegend Proband:innen, die dem einfacheren Lernzirkeltyp zugeordnet wurden. Dagegen gab es in K2 eine gleichmäßige Aufteilung. Im Anschluss an die Zuteilung wurden die Proband:innen klassenintern in einer Rangliste gemäß ihrer richtigen Antworten im Pre-Test geordnet und in Zweier- bzw. Dreiergruppen eingeteilt, in denen die Lernzirkel gemeinsam durchlaufen wurden.

4.2. Diskussion der Gütekriterien

Da das Testinstrument für die Studie leicht modifiziert wurde (siehe Abschnitt 3.1), wurden die Gütekriterien überprüft, die nachfolgend kurz präsentiert werden.

In Tabelle 4 sind die minimalen Trennschärfen für die jeweiligen Items der vier VKS-Teilfähigkeiten dargestellt. Bis auf die Werte für IN und UN im Prä-Test liegen alle Werte in einem als gut zu betrachtenden Bereich von über 0,5 (vgl. Döring, 2023, S.472). Es wurden keine Items aus der weiteren Betrachtung ausgeschlossen. Die limitierte Trennschärfe muss aber bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden.

Tab. 4: Minimale Trennschärfen zu den Items der jeweiligen Teilfähigkeiten zur VKS für das für die Studie modifizierte Testinstrument. Quelle: Eigene Darstellung.

Items	Minimale Trennschärfen	
	Pre-Test	Post-Test
IN	0,42	0,54
ID	0,57	0,59
PL	0,57	0,65
UN	0,19	0,52

Für die Reliabilitätsbetrachtung wurde Cronbachs Alpha als Referenzgröße bestimmt. Da in der weiteren Analyse die leichteren Teilfähigkeiten (ID und IN) sowie die schwereren Fähigkeiten (PL und UN) zu zwei Teilskalen für den Vergleich mit einer früheren Studie zusammengefasst werden (vgl. Goertz, 2022, S.265f., siehe auch Tabelle 2), sind in Tabelle 5 die Werte für die beiden Teilskalen sowie die gesamte VKS-Skala dargestellt.

Tab. 5: Reliabilitäten der beiden VKS-Teilskalen sowie der gesamten VKS-Skala. Quelle: Eigene Darstellung.

Skala	$\alpha_{Cronbach}$	
	Pre-Test	Post-Test
ID_IN	0,64	0,78
PL_UN	0,58	0,82
VKS-Gesamt	0,74	0,87

Die Reliabilitäts-Werte in Tabelle 5 zeigen durchweg akzeptable Werte sowohl für die beiden Teilskalen ID_IN und PL_UN als auch für die gesamte VKS-Skala (vgl. Schecker, 2014, S.1; vgl. Tiber, 2017, S.1278).

Das letzte Gütekriterium der Objektivität wird als gegeben vorausgesetzt, da sowohl die Aufnahme der Daten als auch die Codierung digital und personenunabhängig erfolgte.

4.3. Ergebnisse der VKS-Tests

Die Ergebnisse der Studie stützen sich in erster Linie auf die Auswertung des eingesetzten VKS-Testinstruments, um erste Erkenntnisse zur Wirkung der beiden Lernzirkeltypen zu erhalten und diese mit bekannten Daten (s. Abschnitt 3.2) zu vergleichen.

In Abbildung 2 findet sich der Vergleich der Pre-Post-Testergebnisse für die gesamte VKS-Skala (alle 13 Items), aufgeschlüsselt für die Proband:innen, welche die beiden Lernzirkel vom Typ A und Typ B bearbeitet haben.

Zu konstatieren sind die grundsätzlich unterschiedlichen Vorwissensstände, mit denen den Schüler:innen

der Teilgruppen Typ A und Typ B in die Interventionsgruppen gestartet sind. Dies ist dem Studiendesign geschuldet, da den Lernzirkel Typ A die Schüler:innen mit den schwächeren Pre-Test-Ergebnissen und den Typ B nur die leistungsstärkeren Schüler:innen bearbeitet haben, wie in Abschnitt 4.1 beschrieben wurde.

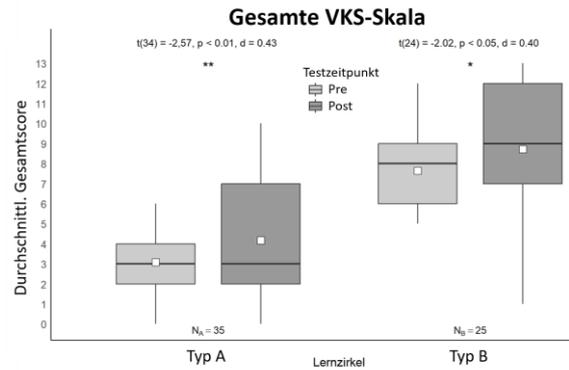


Abb. 2: Pre-Post-Ergebnisse zur gesamten VKS-Skala für Proband:innen, welche die Lernzirkel vom Typ A und Typ B bearbeitet haben. Quelle: Eigene Darstellung.

Für beide Lernzirkel-Typen zeigen sich signifikante Verbesserungen für die gesamte Skala im Pre-Post-Vergleich, die aber in beiden Fällen eine niedrige Effektstärke aufweisen ($d_A = 0,43$ und $d_B = 0,40$). Auffällig ist ebenfalls für beide Lernzirkeltypen, dass die Varianz im Post-Test deutlich höher ist als zum ersten Testzeitpunkt. Dies weist auf unterschiedliche individuelle Wirkungen der Intervention hin.

Abbildung 3 enthält die Pre-Post-Testergebnisse für die beiden Subskalen ID_IN und PL_UN. Hier zeigen sich weitere Gruppenunterschiede.

Für die Skala leichter Items ID_IN (linke Seite in Abbildung 3) sind bei dem Typ A-Lernzirkel kleine signifikante Effekte ($d_{A, ID_IN} = 0,40$) zu verzeichnen. Die große Varianz für die Daten aus dem Post-Test stützt die bereits thematisierte Vermutung einer individuell gerichteten Wirkung. Beim Typ B-Lernzirkel können dagegen hier keine signifikanten Unterschiede beobachtet werden. Dies liegt an den Decken-

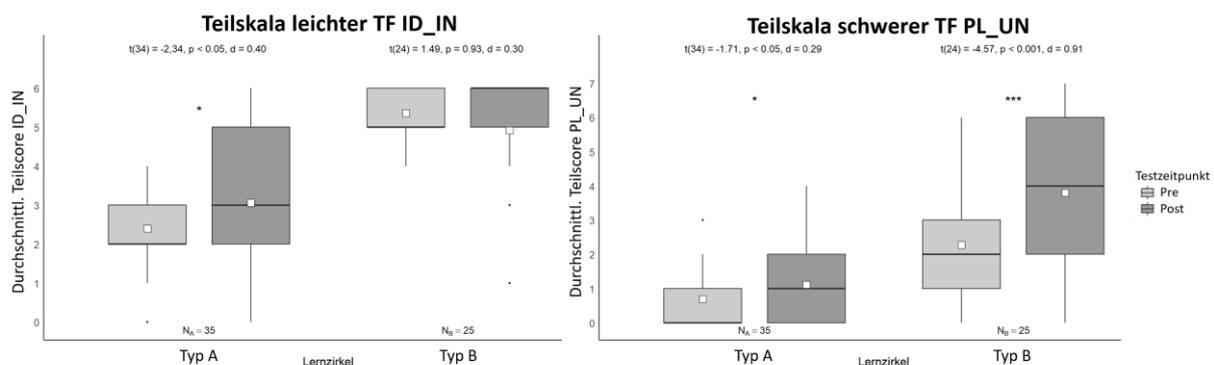


Abb. 3: Pre-Post-Ergebnisse, aufgeteilt in die beiden Teilskalen zu den einfacheren Teilfähigkeiten (TF) ID und IN (bestehend aus 6 Items) und zu den schwereren Teilfähigkeiten PL und UN (bestehend aus 7 Items), für Proband:innen, welche die Lernzirkel vom Typ A und Typ B bearbeitet haben (Details siehe Text). Quelle: Eigene Darstellung.

effekten, die bei den leichten Items für die leistungsstärkeren Schüler:innen aufgrund des Studiendesigns im Pre- und im Post-Test zu erwarten waren.

Die Ergebnisse der Subskala PL_UN mit den schweren Item-Typen sind in Abbildung 3 auf der rechten Seite dargestellt. Für die Gruppe, die den Typ-A Lernzirkel mit einer Station zur Teilfähigkeit Planung (PL) absolviert hat, kann ein kleiner signifikanter Effekt ($d_{A, PL_UN} = 0,29$) ermittelt werden. Für den Typ B-Lernzirkel, bei dem an allen Stationen die schweren Teilfähigkeiten im Fokus standen, kann ein signifikanter Unterschied mit einer großen Effektstärke ($d_{B, PL_UN} = 0,91$) im Pre-Post-Vergleich beobachtet werden. Auch hier ist beim Post-Test eine hohe Varianz in den Boxplots zu erkennen. Eine vergleichende Darstellung der Effektstärken findet sich in Tabelle 6.

Tab. 6: Effektstärken für den Wissenszuwachs bzgl. der VKS-Skalen nach Durchlaufen der Lernzirkel, aufgeteilt nach den Typ A- und Typ B-Lernzirkeln. Bis auf den kursiv markierten Werte weisen alle Werte signifikante Unterschiede zwischen den Testzeitpunkten auf. Quelle: Eigene Darstellung.

Pre-Post-Ergebnisse der vorgestellten Studie		
Skala	Typ A	Typ B
ID_IN	$d = 0,40$	$d = 0,30^*$ <i>*Deckeneffekte</i>
PL_UN	$d = 0,29$	$d = 0,91$
VKS_ges	$d = 0,43$	$d = 0,40$

4.4. Diskussion der Forschungsfrage und weiterer Ergebnisse

Bezüglich der in Abschnitt 3.5 vorgestellten Forschungsfrage, wie sich das VKS-Verständnis nach dem Bearbeiten eines auf Basis der Pre-Test-Ergebnisse zugeordneten Lernzirkeltyps ändert, deuten sich in Abhängigkeit vom Vorwissen der Proband:innen unterschiedlich stark ausgeprägte Entwicklungen des VKS-Verständnisses an. Bei allen folgenden Überlegungen muss die vergleichsweise geringe Stichprobe als ein aussagebegrenzender Aspekt berücksichtigt werden.

Mit den signifikanten Verbesserungen bei beiden Lernzirkeltypen A und B über die gesamte VKS-Skala kann die Hypothese H.1 tendenziell gestützt werden. Die Daten decken sich qualitativ mit den Beobachtungen von Goertz (2022). Allerdings liegen die Effekte in der hier vorgestellten Erhebung nicht wie bei Goertz im Bereich großer Effektstärken, sondern es werden nur kleine Effekte gefunden. Bei den leistungsstarken Proband:innen in Typ B tragen die erwartbaren und unausweichlichen Deckeneffekte bei den leichteren Items (zu ID und IN) zu einer Unterschätzung des Effekts auf der gesamten VKS-Skala bei. Deshalb sollte für die Bewertung der Entwicklung des VKS-Verständnisses dieser Proband:innen-

Gruppe primär die Teilskala zu den schwereren PL- und UN-Items herangezogen werden.

Die zweite Hypothese H.2 bezog sich auf die Entwicklung der VKS-Teilfähigkeiten in Abhängigkeit von den im jeweiligen Lernzirkeltyp fokussierten Teilfähigkeiten. Beim Lernzirkeltyp A sind das die einfachen Teilfähigkeiten ID und IN (bei Typ A insg.: 2xID, 2xIN, 1xPL) und beim Lernzirkeltyp B (2xPL, 3xUN) die schwereren Teilfähigkeiten zur Planung (PL) und zum Verständnis (UN). Die Ergebnisse deuten dabei eine Diskrepanz zwischen den Ergebnissen für die beiden Lernzirkeltypen an. Die Schüler:innen mit niedrigerem Vorwissen aus der Gruppe Typ A zeigen für die Subskala ID_IN zu den leichten Teilfähigkeiten nur Entwicklungen mit kleiner Effektstärke. Für Schüler:innen aus der Gruppe Typ B und damit mit hohem Vorwissen werden hingegen große Effekte bei den schwereren Teilfähigkeiten (Skala PL_UN) festgestellt. Somit kann die Hypothese H.2 mit den hier vorliegenden Daten nur für die Schüler:innen mit hohem Vorwissen gestützt werden.

Während die Ergebnisse der Typ B-Gruppe erwartungskonform ausfallen, erscheinen die Ergebnisse der Typ A-Gruppe zunächst nicht intuitiv, da eine auf das individuelle Fähigkeitsniveau angepasste Aufgabenumgebung geboten wurde, von der ein starker Lerneffekt erhofft wurde. Jedoch führt das gewählte Setting auch zu Konsequenzen, welche die vergleichsweise geringe Entwicklung im Wissenszuwachs bei den leichten ID- und IN-Items für die Gruppe Typ A erklären könnten. So können die Gruppenzusammensetzungen der Zweier- und Dreiergruppen, in denen die Schüler:innen den Lernzirkel bearbeitet haben, einen wesentlichen Einfluss genommen haben. In der Untersuchung von Goertz (2022) sind durch die zufällige Gruppenzusammenstellung leistungsheterogene Kleingruppen entstanden, während im hier vorgestellten Setting durch die Einteilung nach dem Pre-Test in leistungshomogenen Gruppen gearbeitet wurde. Durch die anderen Gruppenkonstellationen können beispielsweise etwaige Peer-Tutoring-Effekte innerhalb der Gruppen ausbleiben und damit die Ergebnisse beeinflussen. Ein weiterer Aspekt, der durch die Studienleitung beobachtet wurde, aber nicht durch Testinstrumente erfasst wurde, ist eine augenscheinlich geringere Lesekompetenz der Typ-A Gruppe, welche hier die eigenständige Bearbeitung der Arbeitsblätter erschwert haben könnte.

Die beobachteten Ergebnisse werfen deshalb die Frage auf, inwiefern binnendifferenzierte Aufgabenstellungen, die mit der Bearbeitung in leistungshomogenen Kleingruppen verbunden sind, leistungsschwächere Schüler:innen wirklich fördern oder ob dieser Ansatz diese Schüler:innen sogar eher benachteiligt, weil er Leistungsunterschiede in heterogenen Gruppen verstärken kann. Allgemein deuten die hohen Varianzen, die in Abbildung 3 zu sehen sind, auf individuell unterschiedliche Wirkungen der VKS-Förderung hin, und zwar bei beiden Lernzirkeltypen.

Abschließend sollen mögliche Gründe für die im Vergleich zu den Ergebnissen von Goertz (2022) grundsätzlich niedrigeren Effektstärken diskutiert werden. Ein möglicher Grund sind die Veränderungen am Testinstrument, bei dem die Anzahl der Items von 11 auf 13 erhöht und dabei um zwei schwere UN-Items aufgestockt wurde. Für alle Schüler:innen, aber insbesondere für die leistungsschwächeren Proband:innen, die den Typ-A Lernzirkel absolviert haben, könnte das zu einem Absinken der Effektstärke auf der Subskala PL_UN und damit auf der gesamten VKS-Skala führen. Auch die vorgenommene leichte Veränderung der ID-Items könnte deren Lösungswahrscheinlichkeiten gesenkt haben, was bisher aber nicht detailliert untersucht wurde.

Möglicherweise verhinderte positive Effekte von peer-to-peer Erläuterungen, die in leistungsheterogenen Kleingruppen beim Experimentieren an Lernzirkel-Stationen erwartet werden dürfen, waren schon weiter oben diskutiert worden.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde ein binnendifferenzierender Ansatz für eine individuellere Förderung der Variablenkontrollstrategie (VKS) entwickelt, der in einer Pre-Post-Untersuchung mit einer Lernzirkelintervention erstmals mit $N = 87$ Schüler:innen aus drei gymnasialen Klassen der 7. Jahrgangsstufe erprobt wurde. Die Schüler:innen wurden auf Basis ihrer Pre-Test-Ergebnisse in Kleingruppen von 2-3 Schüler:innen zwei Lernzirkeln zugeordnet: einem Lernzirkel Typ A, dessen Fokus auf den leichten VKS-Teilfähigkeiten zum Interpretieren der Ergebnisse kontrollierter Experimente (IN) und zur Identifikation kontrollierter Experimente (ID) lag, oder einem Lernzirkel Typ B mit Fokus auf den schweren Teilfähigkeiten zur Planung kontrollierter Experimente (UN) und zum Verständnis der mangelnden Aussagekraft konfundierter Experimente (UN). Dabei haben die Schüler:innen in beiden Lernzirkeln an denselben experimentellen Aufbauten gearbeitet. Durch teilfähigkeitsspezifische Arbeitsblattvorlagen konnten die Anleitungen jedoch je nach gewünschtem Fokus auf die Schulung verschiedener VKS-Teilfähigkeiten ausgelegt werden. Die Forschungsfrage, wie sich das VKS-Verständnis nach dem Bearbeiten eines auf Basis der Pre-Test-Ergebnisse zugeordneten Lernzirkeltyps ändert, konnte auf Basis der erhobenen Daten in zwei Schritten beantwortet werden.

Für beide Lernzirkeltypen konnten signifikante Verbesserungen mit jeweils kleinen Effekten hinsichtlich des VKS-Verständnisses ($d_A = 0,43$ und $d_B = 0,40$) verzeichnet werden. Eine besonders starke, signifikante Verbesserung bezogen auf die im Fokus des jeweiligen Lernzirkeltyps stehenden Teilfähigkeiten konnte nur bei den leistungsstärkeren Schüler:innen beobachtet werden, die den Typ B-Lernzirkel ($d_B, PL_{UN} = 0,91$) mit Schwerpunkt auf den Teilfähigkeiten PL und UN bearbeitet haben. Bei den leistungsschwächeren Schüler:innen zeigten sich bei den

im Lernzirkel vom Typ A speziell geförderten Teilfähigkeiten PL und UN nur kleine signifikante Verbesserungen ($d_A, ID_{IN} = 0,40$).

Im Lichte der ersten Ergebnisse der hier präsentierten Studie ist zu klären, inwieweit vor allem die leistungsstarken Schüler:innen von einem differenzierten Experimentieren profitieren und ob der Ansatz angesichts der unterschiedlichen Leistungsentwicklungen möglicherweise die Leistungsheterogenität weiter verstärkt und damit leistungsschwächere Schüler:innen benachteiligt.

Eine zukünftige Untersuchung mit einer größeren und klassenstufenübergreifenden Stichprobe wird zielführend sein, um die Fragestellung nach der Wirksamkeit des binnendifferenzierenden Ansatzes zur Förderung der Variablenkontrollstrategie beantworten zu können.

6. Literatur

- Bohrmann, M. (2017). Zur Förderung des Verständnisses der Variablenkontrolle im naturwissenschaftlichen Sachunterricht. Berlin: Logos Verlag.
- Brandenburger, M.; Mikelskis-Seifert, S. (2019). Facetten experimenteller Kompetenz in den Naturwissenschaften. In: Naturwissenschaftliche Bildung als Grundlage für berufliche und gesellschaftliche Teilhabe. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Jahrestagung in Kiel 2018. Hrsg. von Christian Maurer, S.77–80.
- Brandenburger, M.; Salim, C. A.; Schwichow, M.; Wilbers, J.; Mikelskis-Seifert, S. (2022). Modellierung der Struktur der Variablenkontrollstrategie und Abbildung von Veränderungen in der Grundschule. In: Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften, 28 (5), S.1–20.
- Chen, Z.; Klahr, D. (1999). All Other Things Being Equal: Acquisition and Transfer of the Control of Variables Strategy. In: Child Development, 70(5), S.1098–1120.
- Döring, N. (2023). Forschungsmethoden und Evaluation in den Sozial- und Humanwissenschaften. 6. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Goertz, S. (2022). Module und Lernzirkel der Plattform FLexKom zur Förderung experimenteller Kompetenzen in der Schulpraxis – Verlauf und Ergebnisse einer Design-Based Research Studie. Berlin: Logos Verlag.
- Güth, F. (2023). Interessenbasierte Differenzierung mithilfe systematisch variiertes Kontextaufgaben im Fach Chemie. Berlin: Logos Verlag.
- Peteranderl, S.; Edelsbrunner, P. A. (2020). The Predictive Value of Children's Understanding of Indeterminacy and Confounding for Later Mastery of the Control-of-Variables Strategy. In: Front. Psychol., 11, S.1–16.
- Peteranderl, S.; Edelsbrunner, P. A.; Deiglmayr, A.; Schumacher, R.; Stern, E. (2023). What Skills Related to the Control of Variables Strategy

- Need to Be Taught, and Who Gains Most? Differential Effects of a Training Intervention. In: *Journal of Educational Psychology*, 115 (6), S.813–835.
- Schecker, H. (2014). Online Zusatzmaterial: Überprüfung der Konsistenz von Itemgruppen mit Cronbachs alpha. In D. Krüger, I. Parchmann & H. Schecker (Hrsg.), *Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung* (3. Aufl.). Springer Spektrum.
- Schwichow, M.; Christoph, S.; Härtig, H. (2015a). Förderung der Variablen-Kontroll-Strategie im Physikunterricht. *Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht (MNU)*, 68 (6), S.346–350.
- Schwichow, M.; Croker, S.; Zimmerman, C.; Höffler, T.; Härtig, H. (2015b). Teaching the Control-of-Variables Strategy: A Meta-Analysis. In: *Developmental Review*, 39, S.37–63.
- Schwichow, M.; Christoph, S.; Boone, W. J.; Härtig, H. (2016a). The impact of sub-skills and item content on students' skills with regard to the control-of-variables strategy. In: *International Journal of Science Education*, 38 (2), S.216–237.
- Schwichow, M.; Zimmerman, C.; Croker, S.; Härtig, H. (2016b). What students learn from hands-On activities. *Journal of Research in Science Teaching*, 53 (7), S.980–1002.
- Schwichow, M.; Nehring, A. (2018). Variablenkontrolle beim Experimentieren in Biologie, Chemie und Physik: Höhere Kompetenzausprägungen bei der Anwendung der Variablenkontrollstrategie durch höheres Fachwissen? Empirische Belege aus zwei Studien. In: *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 24, S.217–233.
- Taber, K. S. (2017). The Use of Cronbach's Alpha When Developing and Reporting Research Instruments in Science Education. In: *Research in Science Education*, 48, S.1273–1296.
- Theyßen, H.; Schecker, H.; Neumann, K.; Eickhorst, B.; Dickmann, M. (2016). Messung experimenteller Kompetenz – ein computergestützter Experimentiertest. In: *Physik und Didaktik in Schule und Hochschule (PhyDiD)*, 15 (1), S.26–48.
- Winkens, T.; Atahan, S.; Heinke, H. (2024). Variablenkontrollstrategie: Individuelle Förderung hoch 2. In: *Frühe naturwissenschaftliche Bildung. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Jahrestagung in Hamburg 2023*. Hrsg. von Helena van Vorst. Duisburg-Essen. S.362–365.
- Winkens, T.; Heinke, H. (2023a). Diagnose von Kompetenzfacetten zur Variablenkontrollstrategie. In: *PhyDid B –Didaktik der Physik– Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung in Hannover*, S.177–183.
- Winkens, T.; Heinke, H. (2023b). Fortentwicklung eines Testinstruments zur Variablenkontrollstrategie. In: *Lernen, Lehren und Forschen in einer digital geprägten Welt. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Jahrestagung in Aachen 2022*. Hrsg. von Helena van Vorst. Duisburg-Essen, S.754–757.
- Winkens, T.; Heinke, H. (2024). „Arbeitsblattvorlagen als Mittel zur differenzierten Förderung der Variablenkontrollstrategie“. In: *PhyDid B - Didaktik der Physik – Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung in Greifswald*. S.131–138.
- Wodzinski, R. (2016). Heterogenität im Physikunterricht - Fachdidaktische Herausforderungen. In: *Plus Lucis*, 2, S.2–5.
- Zohar, A; David, A. B. (2008). Explicit teaching of meta-strategic knowledge in authentic classroom situations. In: *Metacognition and Learning*, 3 (1), S.59–82.

Blickwinkel von Lehrkräften auf außerschulische Angebote zur MINT-Interessenförderung

Maria Hinkelmann, Heidrun Heinke

I. Physikalisches Institut IA, RWTH Aachen University
hinkelmann@physik.rwth-aachen.de

Kurzfassung

Im Projekt Labs on Tour werden MINT-Angebote der Universität an Schulen gebracht, um Jugendliche niederschwellig für MINT-Themen zu begeistern und Hemmschwellen zu senken. Dafür werden Materialien von Schülerlaboren mobil gemacht und in vierwöchigen Kursen mit je 90-minütigen Einheiten nachmittags an den Schulen in dafür angelegten MINT-AGs durchgeführt. Eine MINT-AG läuft über ein Halbjahr und umfasst drei unterschiedliche Kurse. Die Schüler:innen haben somit die Möglichkeit, verschiedene MINT-Bereiche kennenzulernen und sich dort auszuprobieren. Betreut werden die Kurse von studentischen Hilfskräften (SHK). Lehrkräfte der Schulen sind insofern involviert, als sie für die Werbung der teilnehmenden Schüler:innen und die Anmeldungen in der Schule sowie für die Aufsicht während der AG zuständig sind.

Im Rahmen eines Forschungsprojekts wurden mit Lehrkräften, welche eine AG betreut haben, Interviews geführt und ausgewertet. Diese beleuchten die Meinungen der Lehrkräfte zum Ablauf der AG sowie ihren Blickwinkel auf geeignete Themen und wichtige, allgemeingültige Merkmale für erfolgreiche außerschulische Angebote zur MINT-Interessenförderung. Der Beitrag präsentiert erste Ergebnisse der Interviewstudie.

1. Motivation

„Kinder haben häufig einen spielerischen Zugang zu MINT-Themen und sind zunächst aufgeschlossen und interessiert. Diese Begeisterung erlischt häufig mit zunehmendem Alter.“ (Bundesministerium für Bildung und Forschung [BMBF], 2021). Mit dieser Grundannahme schrieb das BMBF 2021 die zweite Runde der deutschlandweiten MINT-Cluster aus, um sich der Herausforderung zu stellen, den Kreis der an MINT interessierten Jugendlichen zu erweitern und einmal gewonnenes Interesse aufrechtzuerhalten (vgl. ebd.).

Zahlreiche Studien zeigen, dass das Interesse an MINT-Themen besonders in der Sekundarstufe I stark abnimmt (SINUS-Institut & Deutsche Telekomstiftung, 2024; Prenzel et al., 2007). Zu dieser Zeit verlieren viele Jugendliche das Vertrauen in ihre eigenen Fähigkeiten in naturwissenschaftlichen Fächern und wenden sich stattdessen anderen Bereichen zu (vgl. Hannover & Kessels, 2004). Vor dem Hintergrund des steigenden Fachkräftebedarfs und gleichzeitig sinkender Studienanfänger:innenzahlen in den Ingenieurwissenschaften (vgl. Institut der deutschen Wirtschaft, 2023) bedarf es gezielter Maßnahmen zur frühzeitigen, breiten und nachhaltigen Förderung von MINT-Interesse.

Nach Hidi und Renninger (2006) ist die Entwicklung von Interesse ein Prozess, der mit situationalem Interesse beginnt und danach aufrechterhalten werden muss, um schließlich individuelles Interesse zu entwickeln. Somit ist eine Förderung, die über einmalige Interventionen hinausgeht und die Jugendlichen län-

gerfristig begleitet, der Interessenentwicklung zuträglich. Die Person-Object-Theorie von Krapp (1992) besagt weiterhin, dass Interesse dann gefördert wird, wenn Themen für Jugendliche persönlich relevant sind. Angebote, die eine Vielfalt an Themen und Alltagsbezügen aufweisen, erscheinen somit geeignet, um möglichst viele Jugendliche mit unterschiedlichen Interessen und Vorerfahrungen zu erreichen. Darüber hinaus zeigt die Selbstbestimmungstheorie von Deci und Ryan, dass Motivation und Interesse besonders gefördert werden, wenn Autonomie, Kompetenz und soziale Eingebundenheit erlebt werden (vgl. Deci & Ryan, 1993). Somit sollten in einer motivationsfördernden Umgebung die Jugendlichen das Gefühl haben, aus eigenem Antrieb und nach eigenen Interessen zu handeln. Die Angebote sollten passend zu dem Vorwissen der Schüler:innen gestaltet werden und ihnen Erfolgserlebnisse ermöglichen. Außerdem sollte der Kontakt und Austausch mit Peers ermöglicht und gefördert werden. Ein Gemeinschaftsgefühl und eine Verbindung über das gemeinsame Interesse an MINT-Themen können die soziale Eingebundenheit stärken, ebenso wie neue soziale Kontakte.

Darüber hinaus liefern empirische Studien konkrete Hinweise darauf, welche Themen und Tätigkeiten im MINT-Bereich für Jugendliche besonders interessant sind. Die SINUS-Studie 2024 zeigt, dass Schüler:innen vor allem dann Interesse entwickeln, wenn sie einen Bezug zu ihrem eigenen Leben erfahren und die Themen besonders alltagsnah sind. (vgl. SINUS-Institut & Deutsche Telekomstiftung, 2024). Die IPN-Interessenstudie kommt zu ähnlichen Ergebnissen: Tätigkeiten wie Experimentieren, praktische Anwendungen, kreatives Problemlösen und das Arbeiten

an realitätsnahen Fragestellungen werden von Schüler:innen als besonders interessant wahrgenommen (Hoffmann et al., 1998).

2. Das Projekt Labs on Tour

Im Projekt Labs on Tour werden Materialien verschiedener Schülerlabore mobil gemacht und an die Schulen gebracht. Dafür werden halbjährige MINT-Arbeitsgemeinschaften (AGs) angelegt, die nachmittags an den Schulen stattfinden. Innerhalb eines Halbjahres durchlaufen die Teilnehmenden drei verschiedene Kurse, die jeweils in vier 90-minütigen Einheiten durchgeführt werden. Der Fokus der Kurse liegt nicht auf der Vermittlung fachlicher Inhalte, sondern darauf, die Teilnehmenden vielseitig und niederschwellig für MINT-Themen zu interessieren und im besten Fall zu begeistern (vgl. Hinkelmann et al., 2023; Hinkelmann et al., 2024; Hinkelmann et al., 2025). Die Jugendlichen sollen die Möglichkeit erhalten in verschiedene Bereiche hineinzuschnuppern, sich ohne Leistungsdruck auszuprobieren, neue Interessen zu entdecken und bereits bestehende auszubauen. Die Zielgruppe besteht größtenteils aus Schüler:innen der 7. und 8. Jahrgangsstufe, wobei das Projekt sowohl klassen- als auch jahrgangsstufenübergreifend ist. Die Jugendlichen befinden sich somit in ihrer eigenen Schule in einer Peer-Group mit Mitschüler:innen, die ebenfalls Interesse an MINT-Themen haben, und sind gleichzeitig über ihre regulären Schulklassen und meist auch die eigene Jahrgangsstufe hinaus vernetzt. Da die MINT-AGs an den Schulen der Teilnehmenden stattfinden, müssen die Jugendlichen für die Teilnahme keine weiten Wege auf sich nehmen, sodass das Projekt auch auf organisatorischer Seite für die Schüler:innen niederschwellig ist.

Betreut werden die Kurse von studentischen Hilfskräften (SHK) der Schülerlabore, sodass sich die Aufgabenbereiche der Schule lediglich auf die Bewerbung der Angebote, die Koordination der Anmeldungen der Schüler:innen sowie die Bereitstellung eines Raums und einer Aufsichtsperson beschränken. Die Schülerlabore führen den gleichen Kurs in verschiedenen Zeitslots an jeweils anderen Schulen durch, wodurch sie in einem Schuljahr sechs verschiedene AGs erreichen können. Abbildung 1 veranschaulicht, wie ein Beispielskurs in einem Schulhalbjahr in drei Schulen durchgeführt werden kann. Ein Kurs findet

dabei in einem ca. 6-wöchigen Zeitslot statt. Durch die dadurch entstehenden Puffertermine kann - trotz absehbarer oder manchmal auch unvorhergesehener Ausfälle - sichergestellt werden, dass die Kurse vollständig durchgeführt werden können. Sollten die Puffertermine in einem Slot für die Durchführung der Kurse nicht benötigt werden, sind die betreuenden Lehrkräfte für die inhaltliche Gestaltung dieser Einheiten verantwortlich. Abweichend von der idealisierten Darstellung in Abbildung 1, unterscheiden sich in der Realität die Modulangebote an verschiedenen Schulen nicht nur in der Reihenfolge, sondern z.T. auch in ihrer Zusammensetzung.

Die Rückmeldungen zum Projekt fallen durchweg positiv aus – sowohl seitens der teilnehmenden Schulen, der Schülerlabore und studentischen Hilfskräfte als auch von den Schüler:innen selbst. Bereits 1,5 Jahre nach Projektstart nahmen zwölf Schulen (jeweils sechs pro Halbjahr) teil, wobei an mehreren Schulen Rekorde bei den Anmeldezahlen zu AGs verzeichnet wurden. Im aktuellen Regelbetrieb werden jährlich ca. 235 Schüler:innen (ca. 40% davon Mädchen) mit jeweils 18 Stunden voller Angebote zur MINT-Interessenförderung aus verschiedenen Bereichen erreicht.

3. Forschungsfragen

Um das Projekt kontinuierlich weiterzuentwickeln, aber auch seine Anziehungskraft zu verstehen und daraus Erfolgsfaktoren abzuleiten, die auf andere Projekte übertragbar sind, wird das Projekt im Rahmen eines Promotionsprojektes umfassend beforscht. In diesem Rahmen soll unter anderem die Forschungsfrage beantwortet werden, welche inhaltlichen Merkmale und Rahmenbedingungen die breite Nutzung von außercurricularen Angeboten zur MINT-Interessenförderung durch Schüler:innen der Mittelstufe fördern.

Zur Beantwortung dieser Frage wurden unter anderem Interviews mit betreuenden Lehrkräften der MINT-AGs verschiedener Schulen geführt, um ihre Meinung zum Ablauf der AG sowie ihren Blickwinkel auf interessefördernde Themen, Tätigkeiten sowie wichtige Gestaltungsmerkmale außerunterrichtlicher MINT-Angebote zu ermitteln. Die Interviews sollen Antworten auf Teilaspekte der folgenden Forschungsfragen geben:

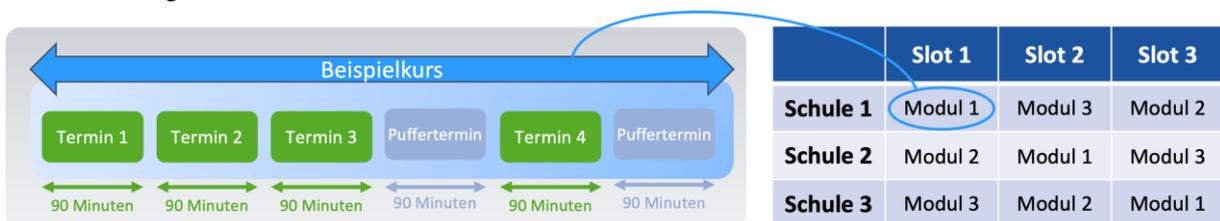


Abb. 1: Beispielskurs von Labs on Tour. Ein Kurs besteht aus vier 90-minütigen Terminen, die in einem sechswöchigen Zeitraum durchgeführt werden. Die Puffertermine wurden nach ersten Praxiserfahrungen eingeführt und sollen Ausfälle kompensieren. Sie werden bei Bedarf von den Lehrkräften gestaltet. Ein Schulhalbjahr teilt sich in drei Zeitslots ein, sodass ein Schülerlabor den Beispielskurs nacheinander in drei verschiedenen Schulen durchführt. Quelle: Eigene Abbildung.

1. Welche inhaltlichen Merkmale fördern die breite Nutzung von außercurricularen Angeboten zur MINT-Interessenförderung?
 - a) Welche Themen und Tätigkeiten im MINT-Bereich werden in außercurricularen Lerngelegenheiten von Schüler:innen als interessant wahrgenommen und wie bewerten Lehrkräfte diese?
 - b) Welche Gestaltungsmerkmale sollten außercurriculare Angebote für eine breite MINT-Interessenförderung nach der Einschätzung von Schüler:innen und Lehrkräften aufweisen?

4. Rahmenbedingungen der Datenerhebung

Zur Beantwortung der Forschungsfragen wurden leitfadengestützte Interviews mit Lehrkräften geführt und ausgewertet. Bisher haben 5 Lehrkräfte, darunter 3 weibliche, daran teilgenommen. Alle Lehrkräfte unterrichten MINT-Fächer an Gymnasien der Region und betreuen eine der MINT-AGs in ihrer jeweiligen Schule. Die Interviews wurden per Zoom durchgeführt und aufgezeichnet. Dabei wurde ein Leitfaden verwendet, der sich in zwei Teile gliedert:

1. Fragen zum Ablauf der AG (6 Fragen)
2. Fragen zur Förderung von MINT-Interesse und allgemeinen Rahmenbedingungen (6 Fragen)

Die Dauer der Interviews variierte zwischen 30 und 60 Minuten.

5. Ergebnisse

Für die Darstellung in diesem Beitrag werden nur die Antworten auf ausgewählte Leitfragen aus den Interviews betrachtet. Dabei handelt es sich zunächst nur um solche Teile des Interviews, die sich den Forschungsfragen eindeutig zuordnen lassen.

5.1. Interessefördernde Themen und Tätigkeiten

Die erste der Leitfragen an die interviewten Lehrkräfte, die zur Beantwortung der Forschungsfrage 1 herangezogen wird, lautet: „Welche Themen im

MINT-Bereich interessieren Schüler:innen nach Ihrer Wahrnehmung?“. Die Antworten der Lehrkräfte lassen sich in drei Hauptkategorien einordnen:

- Technologie und Digitalisierung
- Naturwissenschaftliche Themen
- Alltagsthemen und Anwendungsbezug

Jeder der Hauptkategorien sind drei Themen zugeordnet, die in Abbildung 2 aufgeführt sind. Die dort aufgelisteten Themen wurden in den fünf Interviews von einer bis zu drei Lehrkräften genannt. Dabei haben die Lehrkräfte im Durchschnitt etwa drei Themen genannt, wobei die Zahl von 2 bis 7 variierte. Mehrfachnennungen eines Themas innerhalb eines Interviews wurden nicht gezählt.

Das Thema, welches von den Lehrkräften insgesamt am häufigsten genannt wurde, war mit drei Nennungen „Informatik und Programmierung“. Themen, die zweifach genannt wurden, sind „3D-Druck“, „Biologie, Pflanzen und Tiere“ sowie „Medizinphysik und der menschliche Körper“ (siehe Abbildung 2).

Die Lehrkräfte wurden auch explizit nach Tätigkeiten gefragt, die von Schüler:innen als interessant wahrgenommen werden. Hierauf wurde von den Lehrkräften viermal „Experimentieren“ und je zweimal „Konstruieren“ oder „Bauen“ und „Programmieren“ genannt (siehe Abbildung 3). Als Begründung für den interessiefördernden Charakter der Tätigkeiten gaben alle fünf befragten Lehrkräfte praktisches Arbeiten an.

5.2. Interessefördernde Gestaltungsmerkmale

Um relevante Gestaltungsmerkmale außercurricularer Angebote zur MINT-Interessenförderung zu ermitteln, wurden die Lehrkräfte zunächst gefragt, welcher Kurs nach ihrer Einschätzung am besten ankam und welche Aspekte dazu beigetragen haben könnten. Diese Fragestellung schließt naturgemäß auch Aspekte der schon vorher diskutierten Identifikation interessiefördernder Themen und Tätigkeiten ein. Zudem muss bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden, dass an jeder Schule nicht nur

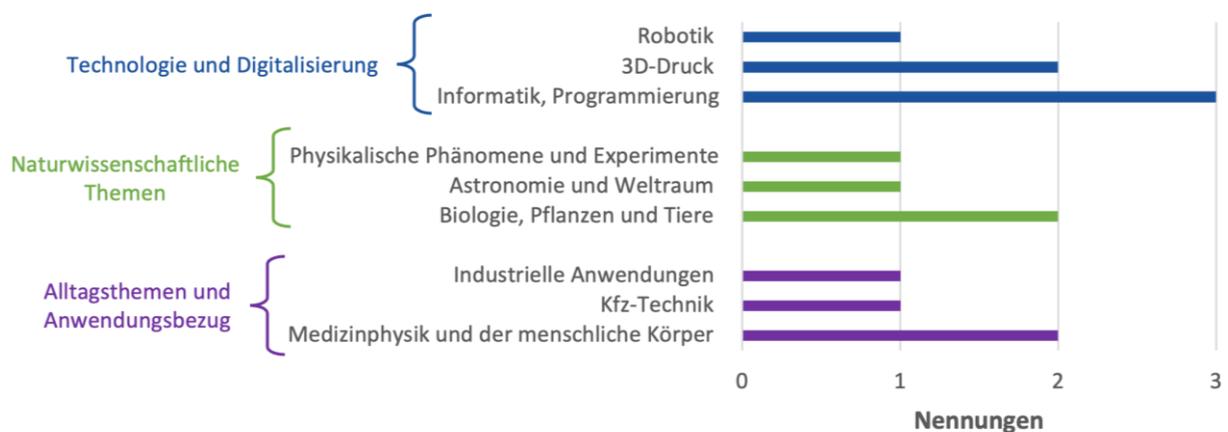


Abb. 2: Interessefördernde Themen aus Lehrkräfteperspektive. Die aufgelisteten Themen wurden in den fünf Interviews von einer bis zu drei Lehrkräften genannt. Mehrfachnennungen innerhalb eines Interviews wurden nicht gezählt. Quelle: Eigene Abbildung.

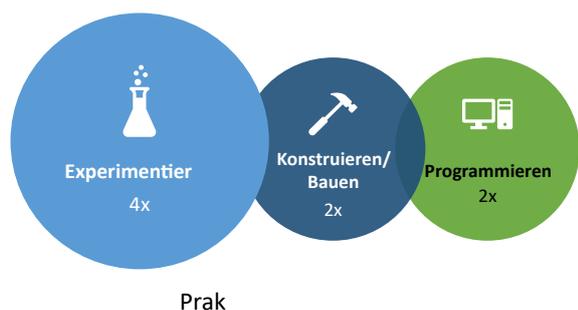


Abb. 3: Interessefördernde Tätigkeiten aus Lehrkräfteperspektive. Die Fläche der Kreise ist proportional zu der Anzahl an Nennungen. Als Begründung für die Interessensförderung durch diese Tätigkeiten gaben alle fünf Lehrkräfte „Praktisches Arbeiten“ an. Quelle: Eigene Abbildung.

unterschiedliche Abfolgen von Kursen, sondern teilweise auch verschiedene Kurse stattfanden. Dadurch kamen nicht alle Kurse gleich oft vor, sodass zur Bewertung der Absolutzahlen der Nennungen auch die Anzahl der Durchführungen berücksichtigt werden muss. Zwei Lehrkräfte legten sich zudem nicht auf einen Kurs fest, sondern nannten jeweils zwei Kurse als gleichermaßen beliebt.

Als besonders positiv wurden nach dieser Einordnung die Kurse „Robotik“ und „Nanowelt“ betrachtet, da diese an jeder Schule, an der sie durchgeführt wurden, auch als beliebtester Kurs bewertet wurden. Weiterhin wurden der Biologie-Kurs und der Kurs zu Smartphoneexperimenten mit der App phyphox jeweils einmal bei zwei Durchführungen genannt (siehe Tab. 1). Nicht aufgeführt in der Tab. 1 sind die Kurse zur Mathematik und Informatik, weil diese bei jeweils 3 Durchführungen nie von den Lehrkräften als beliebteste Kurse benannt wurden. Alle Interpretationen stehen natürlich unter dem Vorbehalt der sehr kleinen Anzahl der Kursdurchführungen.

Passend zu den in Abbildung 3 aufgeführten interesssfördernden Tätigkeiten und ihrer Begründungen wurde bei jeder Nennung der beliebtesten Kurse angegeben, dass diese besonders durch praktisches Arbeiten überzeugen konnten. Im Robotik-Kurs bauen und programmieren die Schüler:innen Lego

Mindstorms Roboter, während in den Kursen „Nanowelt“ und „phyphox“ besonders viel experimentiert wird.

Vergleicht man die Kurse mit den zuvor genannten beliebten Themen, lassen sich Robotik und darüber auch die Programmierung, physikalische Phänomene und Experimente sowie Biologie, Pflanzen und Tiere wiederfinden. Überraschend ist, dass das am häufigsten genannte Thema die „Informatik und Programmierung“ war, der Informatik-Kurs zu den Grundlagen der Arduino-Programmierung bei drei Durchführungen jedoch nie als beliebtester Kurs genannt wurde. Auch der Mathematik-Kurs erhielt keine Nennung, obwohl er zu großen Teilen aus Programmieren zur Lösung mathematischer Probleme mit starkem Alltagsbezug (hier: social media) besteht. Beide Kurse finden vorwiegend am Computer statt. Es sei hier noch einmal betont, dass die Tatsache, dass die genannten Kurse nicht als beliebteste Kurse (aus Lehrkräftesicht) bewertet wurden, nicht damit gleichgesetzt werden darf, dass diese Kurse unbeliebt waren. Stattdessen setzt diese Aussage die Kurse nur in Relation zu offenbar sehr beliebten Kursen. Die Einschätzung der Kurse wird zudem teilweise auch von subjektiven Faktoren wie den betreuenden Personen beeinflusst.

Die positive Wahrnehmung des Robotik-Kurses bei den Lehrkräften lässt somit darauf schließen, dass auch das nach Einschätzung der Lehrkräfte beliebte Themengebiet „Programmieren“ das Interesse der Jugendlichen vor allem in Kombination mit einem praktischen Bezug und stark handlungsorientierten Inhalten wecken kann.

Um weitere Gestaltungsmerkmale der Kurse zu ermitteln, wurden folgende zwei Leitfragen der Interviews betrachtet:

- Was halten Sie für besonders wichtig, um Jugendliche mit MINT-Angeboten zu erreichen und zu begeistern?
- Wie müssen die Kurse von Labs on Tour gestaltet sein, um das Ihrer Meinung nach zu erreichen?

Die verschiedenen Antworten der Lehrkräfte lassen sich in drei Hauptkategorien unterteilen, die Tab. 2 zu

Tab. 1: Beliebteste Kurse in einem Labs-on-Tour-Halbjahr aus Lehrkräfteperspektive. Bei der Bewertung muss berücksichtigt werden, dass die Kurse in dem Halbjahr unterschiedlich oft durchgeführt wurden.

Kurs	Anzahl Erwähnungen	Anzahl Durchführungen	Begründungen
Robotik	3	3	<ul style="list-style-type: none"> • Praktisches Arbeiten • Thema Robotik • Problemlösen • Besonders motivierte Hilfskräfte
Nanowelt	2	2	<ul style="list-style-type: none"> • Praktisches Arbeiten • Unabhängige Sitzungen
Biologie	1	2	<ul style="list-style-type: none"> • Praktisches Arbeiten
Phyphox	1	2	<ul style="list-style-type: none"> • Praktisches Arbeiten & nicht so theorielastig

Tab. 2: Weitere Gestaltungsmerkmale für interessbefördernde außerschulische MINT-Angebote aus Lehrkräfteperspektive.

Kategorie	Gestaltungsmerkmale
Methoden und Herangehensweisen	<ul style="list-style-type: none"> • Eigenständiges, kreatives Arbeiten • Kleinschrittige Vorgehensweise • Projektarbeit und Wettbewerbe • Abgrenzung vom Unterricht <p style="text-align: right;">} Ausgewogenes Maß an Anleitung und Freiraum</p>
Inhalt und Material	<ul style="list-style-type: none"> • Abgrenzung vom Unterricht • Robustes Material → Ausprobieren und Fehler erlaubt • Niederschwellig
Rahmenbedingungen	<ul style="list-style-type: none"> • Zeitlich begrenzt • Intensive Betreuung, Beziehungsebene und Rollenvorbilder → Hilfskräfte • Kontakt zur Hochschule

entnehmen sind. Jeder der Hauptkategorien sind drei bis vier Gestaltungsmerkmale zugeordnet.

Bei der Umsetzung der Kurse müssen nach den Aussagen der Lehrkräfte die methodische Ausgestaltung und die Herangehensweisen berücksichtigt werden. Insbesondere ist darauf zu achten, dass die Schüler:innen eigenständig und kreativ arbeiten. Eine Lehrkraft erwähnte außerdem, dass eine kleinschrittige Vorgehensweise hilfreich sei, während andere besonderen Wert auf Projektarbeit und Wettbewerbe legten, die in der Regel mit sehr selbstständigem und freiem Arbeiten verbunden sind. Zusammenfassend merkte eine Lehrkraft an, dass es auf ein ausgewogenes Maß an Anleitung und Freiraum ankomme.

Bezogen auf die Inhalte und das in den Kursen verwendete Material wurde betont, dass sich die Kurse deutlich vom regulären Schulunterricht abgrenzen müssen. Dies trifft kategorienübergreifend sowohl hinsichtlich der Methoden als auch der Inhalte und Materialien zu. Das Material soll außerdem niederschwellig und robust sein, sodass die Schüler:innen sich ohne Sorge vor Fehlern ausprobieren können.

In der Kategorie Rahmenbedingungen wurde positiv hervorgehoben, dass das Angebot zeitlich begrenzt ist – sowohl in Bezug auf die 90-minütigen Einheiten als auch darauf, dass sich die Kinder zunächst nur für ein Halbjahr binden müssen. Auch die intensive Betreuung, die durch die aufsichtführende Lehrkraft in Kombination mit den zwei durchführenden studentischen Hilfskräften möglich ist, sowie die dadurch entstehende Beziehungsebene zwischen den Hilfskräften und den Schüler:innen wurde von den Lehrkräften als zentrale Erfolgsbedingung genannt. Außerdem erlangen die Schüler:innen durch die Kurse verschiedener Schülerlabore oft erstmals Kontakt zu Inhalten und Personen der Universität.

5.3. Vergleich der Ergebnisse

Die bisherigen Interviewauswertungen liefern erste Hinweise darauf, welche Themen, Tätigkeiten und Gestaltungsmerkmale von außerschulischen Angeboten aus Sicht von Lehrkräften das MINT-Interesse von Schüler:innen besonders fördern. Die von den Lehrkräften häufig genannten Themenbereiche Informatik, Programmierung, 3D-Druck oder Biologie

und Medizin passen zu den identifizierten Charakteristika Anwendungsbezug und Alltagsnähe, welche weiterhin im Einklang mit den Befunden der SINUS-Studie 2024 stehen (vgl. SINUS-Institut & Deutsche Telekomstiftung, 2024).

Auch bei den Tätigkeiten stimmen die Ergebnisse weitgehend überein: Die Lehrkräfte nannten Experimentieren, Programmieren und Bauen/Konstruieren als besonders interessant – Tätigkeiten, die auch in der IPN-Interessenstudie als besonders motivierend beschrieben wurden (Hoffmann et al., 1998).

Insgesamt bestätigen die Interviewdaten zentrale Befunde der vorliegenden Studien und unterstreichen die Bedeutung praktischer, lebensnaher und aktivierender Zugänge zur Förderung von MINT-Interesse.

6. Fazit und Ausblick

Die bisherigen Auswertungen der Lehrkräfte-Interviews ergeben erste Erkenntnisse dazu, welche Themen, Tätigkeiten und Gestaltungsmerkmale von außerschulischen Angeboten aus der Sicht von Lehrkräften besonders zur MINT-Interessenförderung beitragen. Häufig genannt wurden Inhalte wie Informatik, 3D-Druck, Biologie und Medizinphysik. Als zentrale Tätigkeiten wurden insbesondere das praktische Arbeiten beim Experimentieren, Bauen und Programmieren hervorgehoben.

Beliebte Kurse wie „Robotik“ oder „Nanowelt“ zeichnen sich ebenfalls durch praktisches und selbstständiges Arbeiten aus. Obwohl das Programmieren von den Lehrkräften als besonders interessbefördernd bewertet wurde, fanden entsprechende Programmierkurse bei den selben Lehrkräften zumindest im Vergleich mit anderen Kursen weniger Anklang. Daran änderte auch der teilweise stark ausgeprägte Praxisbezug der Inhalte der Programmieraufgaben nichts.

Darüber hinaus betonten die Lehrkräfte die Bedeutung einer methodischen und inhaltlichen Abgrenzung vom Regelunterricht, kleinschrittiger strukturierter Aufgabenstellungen, kreativer Freiräume sowie einer intensiven Betreuung. Auch die zeitliche Begrenzung der Angebote und niederschwellige, robuste Materialien wurden als hilfreich bewertet.

Insgesamt zeigt sich, dass neben der Themenwahl auch die konkrete Umsetzung entscheidend für eine erfolgreiche MINT-Interessenförderung ist.

In weiteren Schritten werden die Interviews mit den Lehrkräften noch weiterführend ausgewertet sowie weitere Datensätze aus Umfragen mit Lehrkräften einbezogen.

Ergänzend wird die Perspektive der Schüler:innen näher betrachtet. Diese haben ebenfalls Umfragen ausgefüllt und sich in Gruppendiskussionen zu interesselördernden Themen und Gestaltungsmerkmalen außerschulischer MINT-Angebote ausgetauscht.

Der Vergleich der Perspektiven von Schüler:innen und Lehrkräften soll es ermöglichen, ein ganzheitliches Bild auf die Wahrnehmung von Erfolgsfaktoren für die Interessenförderung im MINT-Bereich bei Kindern und Jugendlichen zu gewinnen. Mögliche Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen den Bewertungen von Schüler:innen und ihren Lehrkräften werden dann in ihrer Bedeutung für die praktische Umsetzung einer gelingenden MINT-Interessenförderung zu beurteilen sein.

7. Literatur

- Bundesministerium für Bildung und Forschung [BMBF]. (2021, 19. Februar). Zweite Richtlinie zur Förderung regionaler Cluster für die MINT-Bildung von Jugendlichen (MINT-Bildung für Jugendliche), Bundesanzeiger vom 01.02.2021. https://www.bmbf.de/SharedDocs/Bekanntmachungen/DE/2021/02/3353_bekanntmachung-.html, abgerufen am 22.05.2025
- Deci, E. L., & Ryan, R. M. (1993). Die Selbstbestimmungstheorie der Motivation und ihre Bedeutung für die Pädagogik. *Zeitschrift für Pädagogik*, 39(2), 223–238.
- Hidi, S., & Renninger, K. A. (2006). The four-phase model of interest development. *Educational Psychologist*, 41(2), 111–127.
- Hinkelmann, M. & Heinke, H. (2025). Zwei Blickwinkel auf außerunterrichtliche MINT-Interessenförderung. In H. van Vorst [Hrsg.], *Frühe naturwissenschaftliche Bildung. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik. Jahrestagung in Bochum 2024*. Duisburg-Essen: Universität 2024, eingereicht
- Hinkelmann, M. & Heinke, H. (2024). Labs on Tour – ein Konzept zur MINT-Interessenförderung. In H. van Vorst [Hrsg.], *Frühe naturwissenschaftliche Bildung. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik. Jahrestagung in Hamburg 2023*. Duisburg-Essen: Universität 2024, 670 - 673
- Hinkelmann, M., Heinke, H., & Winkens, T. (2023). Labs on Tour: MINT-Angebote im Nachmittags- und Freizeitbereich. In *PhyDid B - Didaktik Der Physik - Beiträge Zur DPG-Frühjahrstagung*. <https://ojs.dpg-physik.de/index.php/phydid-b/article/view/1394>, abgerufen am 22.05.2025
- Hoffmann, L., Häußler, P., & Lehrke, M. (1998). Die IPN-Interessenstudie Physik (IPN. 158). Kiel: Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.
- Institut der deutschen Wirtschaft. (2023). MINT-Frühjahrsreport 2023: MINT-Fachkräftelücke weiterhin hoch. https://www.iwkoeln.de/fileadmin/user_upload/Studien/Gutachten/PDF-/2023/MINT-Frühjahrsreport_2023.pdf, abgerufen am 22.10.2025
- Krapp, A. (1992). Das Interessenkonstrukt. Bestimmungsmerkmale der Interessenhandlung und des individuellen Interesses aus der Sicht einer Person-Gegenstands-Konzeption. In A. Krapp & M. Prenzel (Hrsg.), *Interesse, Lernen, Leistung. Neuere Ansätze einer pädagogisch-psychologischen Interessenforschung* (S. 297–329). Aschendorff.
- Prenzel, M., Rost, J., Senkbeil, M., Eilerts, K., & Drechsel, B. (2007). Kompetenzen von Schülerinnen und Schülern am Ende der neunten Jahrgangsstufe im internationalen Vergleich. In M. Prenzel (Hrsg.), *PISA 2006: Die Ergebnisse der dritten internationalen Vergleichsstudie* (S. 51–134). Waxmann.
- SINUS-Institut, & Deutsche Telekom Stiftung. (2024). Was motiviert für MINT? <https://www.telekom-stiftung.de/aktivitaeten/was-motiviert-fuer-mint/>, abgerufen am 20.10.2025

Danksagung

Das Projekt wird im Rahmen der BMBF-Ausschreibung zu regionalen MINT-Clustern unter dem Förderkennzeichen 16MCJ2066B gefördert.

Educative Curriculum Materials zum Treibhauseffekt

- Lehrendenmaterial für den Physikunterricht -

Ivo Naake*, Thomas Wilhelm*

*Institut für Didaktik der Physik, Goethe-Universität Frankfurt am Main, Max-von-Laue-Str. 1, 60438 Frankfurt
naake@physik.uni-frankfurt.de, wilhelm@physik.uni-frankfurt.de

Kurzfassung

Der Treibhauseffekt bietet eine gute Möglichkeit, auch im Physikunterricht Klimabildung zu betreiben. In ihrem Promotionsprojekt hat Sarah Wildbichler deswegen ein Konzept zum Treibhauseffekt für den Physikunterricht entworfen, das explizit Lernendenvorstellungen berücksichtigt. Bisher wurde dieses Konzept im Lernendenlabor der Universität Innsbruck durchgeführt und evaluiert. Damit dieses Material auch im Regelunterricht eingesetzt und evaluiert werden kann, muss es jedoch angepasst werden. Zusätzlich muss geprüft werden, welche Unterstützung Lehrkräfte für die Integration benötigen. Eine Möglichkeit nicht nur das Material in den Unterricht zu bringen, sondern gleichzeitig auch Lehrkräften Hilfestellungen beim Unterrichten des Treibhauseffekt zu bieten, stellen Educative Curriculum Materials dar. Diese umfassen nicht nur Materialien für Lernende, sondern auch Hintergrundinformationen für Lehrende zu beispielsweise fachlichen oder didaktischen Grundlagen. Der Beitrag beschreibt zunächst das ursprüngliche Material und typische Lernendenvorstellungen über den Treibhauseffekt und stellt anschließend das abgewandelte Material für die Lehrkräfte an einigen Beispielen vor.

1. Educative Curriculum Materials

Lehrkräften kommt bei der Implementation neuer Unterrichtskonzepte eine zentrale Rolle zu. Neue Konzepte werden jedoch vor allem für die Lernenden konzipiert und berücksichtigen nicht, dass auch Lehrkräfte etwas Neues lernen (müssen), wenn sie mit neuentwickelten Materialien interagieren (Ball & Cohen, 1996, 6; Schneider & Krajcik, 2002, 223). Um also neue Konzepte bestmöglich in den Unterricht zu integrieren, benötigen auch Lehrkräfte Unterstützung und Hintergrundinformationen z.B. zu Fachinhalten oder didaktischen Hintergründen (Remillard, 2005, 239). Eine Möglichkeit, um neben der Verbesserung des Lernens der Schüler:innen auch das Lernen von Lehrpersonen zu fördern, stellen sogenannte „Educative Curriculum Materials“ dar (Schneider et al., 2005, 3). Der Begriff wird besonders in der englischsprachigen Literatur verwendet. Breuer et al. (2022) schlagen im Deutschen den Begriff „materialgestützte Unterrichtskonzeption“ als Übersetzung vor. Alternativ wird auch der Begriff „Lehrkräftehandreichung“ vorgeschlagen. Für diesen Artikel wird jedoch der englischsprachige Begriff bzw. die Abkürzung ECM verwendet, weil dieser das Lernen der Lehrkräfte stärker betont. Dieses Lernen drückt sich z.B. dadurch aus, dass das pedagogical content knowledge (PCK) (Vgl. Shulman, 1986) weiterentwickelt wird (Krajcik & Delen, 2017, 1). ECM eignen sich darüber hinaus gut für komplexe Themen wie den Klimawandel (Krajcik & Delen, 2017, 4). Um ihr volles Potential entfalten zu können, sind explizite Unterstützungsangebote und Werkzeuge für Lehrkräfte von Nöten. Diese werden „educative features“

genannt (Hanuscin et al., 2024) Sie können die Form von Tipps, callout boxes oder fachlichen oder didaktischen Hintergrundinformationen haben (Davis et al., 2017). Auch Stundenverläufe, Impulsfragen oder mögliche Lernendenantworten gehören dazu (Hanuscin et al., 2024). Educative features sind somit Bausteine aus denen sich ECM zusammensetzen. Neben diesen educative features, die v.a. auf die Unterstützung der Lehrkräfte abzielen, umfassen ECM allerdings auch weitere Materialien und Ressourcen, die für Lehrer:innen von Bedeutung sein können, wie z.B. Materialien für Schüler:innen.

Bevor die ECM für den Treibhauseffekt vorgestellt werden, werden zunächst gängige Lernendenvorstellungen zum Treibhauseffekt aufgeführt, weil diese für die Unterrichtskonzeption, die den ECM zugrunde liegen, eine wichtige Rolle spielen. Außerdem wird noch das Material von Sarah Wildbichler vorgestellt, auf dessen grundlegenden Ideen die ECM basieren.

2. Lernendenvorstellungen zum Treibhauseffekt

Bezüglich des Treibhauseffekts gibt es viele bekannte Lernendenvorstellungen. In der Literatur haben sich drei große Vorwissenstypen dafür herauskristallisiert, wie sich Schüler:innen den Treibhauseffekt sowie die Ursachen und Hintergründe für die globale Erwärmung vorstellen: (1) Isolierte Wissensstücke: Lernende dieses Vorwissenstyps haben (fast) keine Vorstellungen zum Treibhauseffekt. Fragt man sie nach einer Erklärung für die globale Erwärmung oder den Treibhauseffekt, stellen sie ad hoc Vermutungen auf, die aus einzelnen Wissens-elementen bestehen. Da sie jedoch kaum bis kein Vorwissen zu dieser Thematik

haben, akzeptieren sie die physikalische Erklärung relativ schnell. (2) Reduzierter Wärmeoutput: Die Lernenden dieses Typs denken, dass die Sonnenstrahlung zwar durch die Atmosphäre zur Erde gelangen kann, diese aber nicht mehr verlassen kann. Sie unterscheiden nicht zwangsweise zwischen Strahlungsarten, sondern gehen davon aus, dass Sonnenstrahlen an der Oberfläche der Erde reflektiert werden und dann durch die halbdurchlässige Schicht erneut zurückreflektiert werden. (3) Erhöhter Wärmeinput: Lernende dieses Vorwissentyps gehen davon aus, dass sich die Erde erwärmt, weil mehr Sonnenstrahlen die Erde erreichen. Dafür sehen sie in zwei Gründen die Ursache. Zum einen wird das Ozonloch dafür verantwortlich gemacht, dass mehr Strahlung zur Erde gelangt. Je größer das Ozonloch (z.B. durch Luftverschmutzung), desto mehr Strahlung kann durch die Atmosphäre zur Erde gelangen. Zum anderen denken einige Lernende, dass die Sonne mehr Strahlung in Richtung Erde aussendet und sie sich deswegen erwärmt (Reinfried & Tempelmann, 2014a&b; Schubatzky et al., 2024).

Lernende des zweiten Typs können bei Konfrontation mit neuen Ideen ihre ursprünglichen mentalen Modelle erweitern und rekonstruieren. Somit ist ein *conceptual change* bei Lernenden der ersten beiden Typen relativ einfach anzuregen. Bei Lernenden des letzten Typs fällt dies schwerer. Besonders hinderlich dabei ist die Vorstellung, dass die Erwärmung der Atmosphäre mit einer erhöhten Zufuhr an Wärme begründet wird (Reinfried & Tempelmann, 2014b, 50).

Um mit den Vorstellungen umzugehen und einen Konzeptwechsel zu ermöglichen, werden verschiedene Konzeptwechselstrategien angewandt. Der Fokus dabei liegt auf den Anknüpfungsstrategien, um einen kontinuierlichen Lernweg zu ermöglichen (Vgl. Wilhelm & Schecker, 2018).

Über diese drei Präkonzepttypen hinaus wurde in der Literatur weitere Vorstellungen identifiziert. An dieser Stelle kann auf die Artikel von Schubatzky et al. (2024), Shepardson et al. (2017a&b), Varela et al. (2020) oder Wildbichler et al. (2024) verwiesen werden.

3. Ein Konzept zum Treibhauseffekt

3.1. Das Material

Das von Wildbichler in Innsbruck entwickelte Material wurde für eine achte Klasse konzipiert und behandelt somit den Treibhauseffekt etwas früher, als es viele andere Konzepte intendieren. Die Unterrichtsreihe umfasst minimal drei Stunden, kann aber für ein tiefergehendes konzeptionelles Verständnis auf sechs Stunden erweitert werden. Damit die Lernenden nicht zu stark überfordert werden, ist Vorwissen in den Themengebieten Optik und Wärmelehre vorteilhaft. Selbst mit Vorwissen in diesen Teilgebieten, ist der Treibhauseffekt in der Sekundarstufe I jedoch ein komplexes Thema. Deswegen wurden drei grundlegende Prinzipien für die Reihe formuliert: (1) Bei

(vermutlich) geringem Vorwissen und einer hohen Komplexität eignet sich die Methode der instruktionalen Erklärung (Kulgemeyer, 2018) gut als Methode für die Unterrichtseinheit. (2) Die Inhalte werden in Teilphänomene zergliedert, die den Grundideen des Treibhauseffekts nach Shepardson et al. (2017a&b) entsprechen. (3) Die verbalen Erklärungen werden durch Visualisierungen unterstützt, um den Cognitive Load (Vgl. Mayer & Moreno, 2003) zu reduzieren (Wildbichler et al. 2025, im Druck). Die in (2) erwähnten Teilphänomene und die in (3) angesprochenen Visualisierungen stellen gleichzeitig die Schwerpunkte des Materials von Wildbichler dar.

3.2. Die Zerlegung in Teilphänomene

In der Unterrichtskonzeption wird der Treibhauseffekt in drei Teilphänomene zerlegt. Zunächst wird das Energiegleichgewicht (inkl. Energiequellen und Energietransfer), anschließend die Wechselwirkung zwischen Strahlung und Molekülen (inkl. der Zusammensetzung der Atmosphäre und der besonderen Rolle von Treibhausgasen) und abschließend der natürliche und anthropogene Treibhauseffekt behandelt. Die Zerlegung in Teilphänomene hat das Ziel, dass der intrinsische cognitive load reduziert wird. Dies soll durch zwei Mechanismen geschehen: 1. Durch ein *pre-training*, dem gezielten Vermitteln von grundlegenden Informationen oder Konzepten vor der Bearbeitung komplexerer Inhalte und 2. durch die Sequenzierung innerhalb der einzelnen Teilphänomene, v.a. bei der Erarbeitung des Energiegleichgewichts und des anthropogenen Treibhauseffekts. Des Weiteren wurden aus Elementarisierungsgründen verschiedene Inhalte weggelassen. Dazu gehören z.B. die Wellenlänge von Strahlung oder die quantenmechanische Erklärung der Wechselwirkung zwischen Strahlung und Molekülen, weil diese zu komplex für eine 8. Jahrgangsstufe sind. Außerdem wird nicht auf den Unterschied zwischen naher und ferner Infrarotstrahlung eingegangen, da diese Unterscheidung nicht relevant ist für ein basales Verständnis des Treibhauseffekts.

3.3. Visualisierungen im Material

Neben der Zerlegung in Teilphänomene spielen auch die gewählten Repräsentationsformen (siehe Abb. 1) eine zentrale Rolle für das Material. Im Gegensatz zu klassischen Schulbuchdarstellungen wurde hier z.B. auf eine Farbgebung der verwendeten Pfeile verzichtet. Die Infrarotstrahlung wird darüber hinaus durch gestrichelte Pfeile dargestellt, um zu betonen, dass diese für den Menschen unsichtbar ist. Außerdem wurden verschiedene Pfeilformen gewählt, je nachdem ob die Strahlung transmittiert, gestreut oder absorbiert wird.

Neben der Strahlung werden auch die Moleküle der in der Atmosphäre vorkommenden Gase visualisiert. Für die Moleküle wurde sich dazu entschieden, die chemische Formel als Visualisierungsform zu verwenden. Diese Repräsentationsformen wurden

ausgewählt, weil sie bei Akzeptanzbefragungen mit Lernenden den größten Zuspruch erhalten haben und am ehesten selbst übernommen wurden (Wildbichler et al., 2025, im Druck). Die einzelnen Darstellungen basieren auf den Vorarbeiten von Zloklikovits & Hopf (2021) (Strahlung) und Budimaier & Hopf (2023) (Moleküle).

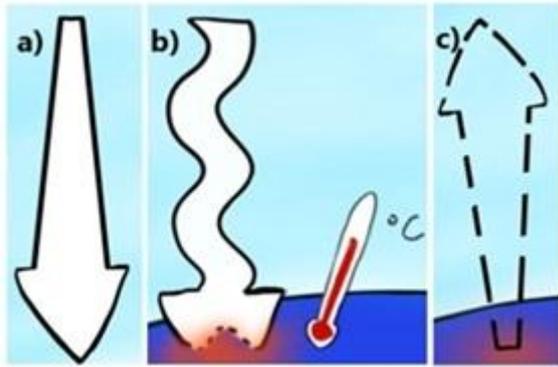


Abb. 1: a) einfallende, transmittierte Strahlung, b) einfallende, absorbierte Strahlung, c) Infrarotstrahlung (mit freundlicher Genehmigung von Sarah Wildbichler und Thomas Schubatzky)

4. Weiterentwicklung des Materials

Die Unterrichtskonzeption von Wildbichler wurde bereits in mehreren Lernendenlaboren durchgeführt und teilweise evaluiert. Die Konzeption soll nun auch in den Regelunterricht integriert werden. Um ein Gelingen dieses Vorhabens zu ermöglichen, muss die ursprüngliche Konzeption jedoch angepasst werden, weil sich die Bedingungen eines Lernendenlabors von denen des Regelunterrichts unterscheiden. Ziel ist es allerdings weiterhin, dass sich das konzeptionelle Verständnis der Schüler:innen durch die Konzeption verbessert und dass man ihnen den Treibhauseffekt näherbringt.

Neben dem eigentlichen Material nehmen auch Lehrpersonen einen großen Einfluss auf den Erfolg des Unterrichts (Li et al., 2021; Mahler et al., 2017). Ein weiteres Ziel des Projekts ist es deswegen, Lehrkräfte mit einer Handreichung zu der Unterrichtskonzeption zum Treibhauseffekt zu unterstützen, die nicht nur Materialien für die Schüler:innen, sondern auch Hintergrundinformationen in Form von essentiellen features (Obczovsky et al., 2023) und educative features (Schneider & Krajcik, 2002) für die Lehrkräfte bereitstellt. Educative features wurden bereits im ersten Abschnitt thematisiert. Essentielle features haben das Ziel, Lehrkräften dabei zu helfen, herauszufinden, welche Merkmale eines Materials zentral sind, um die Schüler:innen auf den vorgesehenen Lernpfad zu führen. Dazu gehören z.B. die zentralen Ideen des Materials und ihre Reihenfolge, verwendete Konzeptwechselstrategien oder Methoden (Obczovsky et al., 2023). Das Material soll also nicht nur dafür sorgen, dass Schüler:innen etwas über den Treibhauseffekt lernen, sondern auch dazu beitragen, dass Lehrkräfte etwas über den Treibhauseffekt lernen (ECM).

Im Fokus stehen dabei besonders die Entwicklung des PCK zur Unterrichtskonzeption von Sarah Wildbichler.

Um Lehrkräfte bei der Implementation der essentiellen features, d.h. der Grundideen, zu unterstützen, muss berücksichtigt werden, dass sich sowohl die Lehrkräfte als auch ihre Lernenden voneinander unterscheiden werden. Die Lehrer:innen werden deswegen unterschiedliche Formen an Unterstützung benötigen bzw. bei der Arbeit mit ECM benutzen (Schneider et al, 2005). Deswegen kommen in dem Material verschiedene educative features vor, um diese unterschiedlichen Bedürfnisse zu berücksichtigen. Sie umfassen fachliche (z.B. zum Strahlungshaushalt oder zur Wechselwirkung zwischen Strahlung und Molekülen) und didaktische (z.B. zu möglichen Lernendenvorstellungen) Hintergrundinformationen, Beispiele für Stundenverlaufspläne inklusive möglicher Lernziele, Tipps und Hinweise oder Anmerkungen zur Lernendenperspektive (z.B. mögliche Antworten, die von den Schüler:innen kommen können).

Key Ideas

An dieser Stelle werden die Kerngedanken des Unterrichtsmaterials übersichtlich zusammengefasst:

Tabelle 3: Key Ideas

Übergeordnete Idee	Key Idea
1 Strahlungshaushalt	Die Erde wird von der Sonne in Form von sichtbarem Licht bestrahlt.
2	Davon wird ein Teil absorbiert und ein anderer Teil reflektiert.
3	Die Erde selbst sendet langwelliges, unsichtbares Licht aus.
4 Energiegleichgewicht	Die Summe aus reflektierter Sonnenstrahlung und emittierter Infrarotstrahlung der Erde ist genau so groß wie die einfallende Strahlung von der Sonne.
5 Atmosphäre	Die Atmosphäre setzt sich aus verschiedenen Molekülen zusammen.
6	Die Moleküle sind gleichmäßig in der Atmosphäre verteilt.
7 Treibhausgase und Wechselwirkung mit der Strahlung	Einge der Gasmoleküle lassen die Wärmestrahlung hindurch, andere absorbieren sie. Letztere nennt man Treibhausgase.
8	Die Treibhausgase können Strahlung in alle Richtungen emittieren, auch in Richtung der Erde.
9 Natürlicher Treibhauseffekt	Dadurch erwärmt sich die Erde (und die Atmosphäre) zusätzlich bis sich ein Gleichgewicht einstellt. Durch diese Gleichgewichtstemperatur wird das Leben auf der Erde, so wie wir es kennen, erst möglich.
10 Anthropogener Treibhauseffekt	Menschliche Aktivitäten erhöhen die Konzentration der Treibhausgase in der Atmosphäre, wodurch der natürliche Treibhauseffekt verstärkt wird. Dadurch erwärmt sich die Erde zusätzlich. Man spricht von globaler Erwärmung.

Didaktische Begründung der Inhalte und der Reihenfolge

Diese Key Ideas wurden unter Berücksichtigung gängiger Lernvoraussetzungen ausgewählt. Die Behandlung des Strahlungshaushalts und des Energiegleichgewichts soll die verschiedenen Strahlungsarten (IR-Strahlung und das Sonnenlicht) hervorheben, weil viele Lernende nicht zwischen diesen unterscheiden. Durch die Behandlung der Wechselwirkung wird die besondere Rolle der Treibhausgase in der Atmosphäre bewusster gemacht. Es wird außerdem klar, wie die vorher behandelten Strahlungsarten mit unterschiedlichen Gasen wechselwirken können. Erst wenn diese Grundlagen verstanden wurden, können die Lernenden den natürlichen Treibhauseffekt verstehen. Danach ist es nur noch ein kleiner Schritt, um auch den anthropogenen Treibhauseffekt zu verstehen. Durch diese Zerlegung in elementare Sinneinheiten kann außerdem der sogenannte *cognitive load* verringert werden. Das Vermitteln von grundlegenden Teillelementen ermöglicht es, die deutlich komplexeren Zusammenhänge zu vereinfachen. Außerdem folgt der Unterrichtsengang so einem klaren roten Faden und die Grundlagen werden durch das Behandeln des natürlichen und anthropogenen Treibhauseffektes noch einmal wiederholt und vertieft. Um den *cognitive load* zusätzlich zu reduzieren, wurden außerdem einige fachliche Ideen für die Lernenden weggelassen, die eigentlich auch zur Behandlung des Treibhauseffektes beitragen. Dazu gehören: 1) die Wellenlänge von Strahlung, 2) Rolle der UV-Strahlung, 3) Unterschied zwischen ferner und naher Infrarotstrahlung, 4) die Rolle der IR-Strahlung der Sonne 5) die Quellen von Treibhausgasen, 6) CO₂-Senken und der CO₂-Zyklus, 7) quantenmechanische Erklärung der Wechselwirkung zwischen Strahlung und Treibhausgasen, 8) Benennung des Albedo-Effekt und 9) die „Schneeball-Erde“.

Hinweis:

Die Key Ideas sollten in der vorgegebenen Reihenfolge behandelt werden, da die jeweiligen vermittelten Inhalte wichtig sind für die folgenden Inhalte.

Weggelassene Ideen:

Quellen von THG, CO₂-Senken & Auswirklungen des anthropogenen THE → sind fachliche Ideen zum Klimawandel und für ein Verständnis des THE nicht relevant;
Wellenlänge von Strahlung & quantenmechanische Erklärung der Wechselwirkung zwischen THG und IR → zu komplex für diese Klassenstufe;
Unterschiede nahes und ferne IR-Strahlung, IR-Strahlung der Sonne & Albedo → nicht notwendig für ein basales Verständnis, stehen dem Konzept aber nicht hinderlich im Weg;
UV-Strahlung → um die Ozonlochvorstellung zu umgehen

Abb. 2: Didaktische Hintergrundinformationen (eigene Darstellung)

Ergebnisse der Implementationsforschung zeigen darüber hinaus, dass Lehrkräfte Materialien immer an ihre verschiedenen Klassen anpassen (Ball & Cohen, 1996) und bei der Arbeit mit neuen didaktischen Innovationen Freiheiten bezüglich der Umsetzung haben wollen (Breuer et al., 2022). Deswegen werden in den Materialien für die Lehrkräfte auch Vorschläge dafür gemacht, wie die einzelnen Stunden differenziert und abgewandelt werden können. Darüber hinaus wird auch zusätzliches Material erstellt bzw. auf andere Quellen verwiesen. In Abbildung 2 und 3 ist

das weiterentwickelte Material beispielhaft dargestellt.

Aufgabe 2

Vervollständigt nun den Lösungstext, indem ihr die richtigen Begriffe einsetzt.

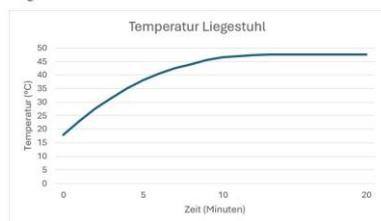
Durch die Atmosphäre gelangt **Energie von der Sonne** vor allem in Form von _____ (sichtbarem Licht/ Infrarotstrahlung/UV-Strahlung) zu den Liegestühlen. Ein Teil des Lichts wird **gestreut**, der andere Teil des Lichts wird **aufgenommen**. Dadurch erhöht sich die **thermische Energie** der Liegestühle. Am hellen Stuhl wird _____ (mehr/weniger) Licht gestreut und _____ (mehr/weniger) Licht aufgenommen. Am dunklen Stuhl wird _____ (mehr/weniger) Licht aufgenommen und _____ (mehr/weniger) Licht gestreut. Daher erwärmt sich der dunkle Stuhl _____ (stärker/schwächer). Beide Stühle **geben dann wieder Energie ab**, und zwar in Form von _____ (sichtbarem Licht/ Infrarotstrahlung /UV-Strahlung). Der _____ (helle/dunkle) Stuhl gibt mehr _____ (sichtbares Licht/ Infrarotstrahlung /UV-Strahlung) ab, da er sich stärker erwärmt hat.

Differenzierungsvorschlag:

Statt die Begriffe hinter den Lücken vorzugeben, können diese entweder komplett weggelassen werden oder es werden nur die richtigen Lösungen gesammelt vor/nach dem Lückentext aufgeführt.

Aufgabe 3

Ihr messt die Temperatur des dunklen Liegestuhls mithilfe eines Temperatursensors. Du beginnst deine Messung, als der Stuhl in die Sonne gestellt wird. Deine Ergebnisse sind in dem Diagramm unten dargestellt.



Adaptionsvorschläge:

Aufgabe 3 könnte man auf verschiedene Weisen abändern:

- Zum einen könnten die Lernenden selbstständig experimentieren. (zeitaufwendig) Dafür sollte die Lampe vorher eingeschaltet werden, um sich bereits aufzuheizen.
- Man könnte ein Video des Experiments zeigen, um aufzuzeigen wo die Daten herkommen
- Man kann zwei Kurven in das Diagramm übernehmen (je eine pro Stuhl)
- Sollte man auf eine Wärmebildkamera Zugriff haben, kann man bei diesem AB auch noch die IR-Strahlung visualisieren.

Abb. 3: Differenzierungs- und Adaptionsvorschläge (eigene Darstellung)

Neben der bereits erwähnten educative features und dem Material für die Schüler:innen wird den Lehrkräften auch zusätzliches Material zur Verfügung gestellt, mit dem sie weitere Variationen in den Unterricht bringen können. Obwohl den Lehrkräften bei der Umsetzung viele Freiheiten gelassen und Alternativen vorgeschlagen werden, ist es ein weiteres Ziel des Promotionsprojekts, dass bezüglich der Kerngedanken des Materials und der gewählten Visualisierungsformen eine hohe Umsetzungstreue erzielt wird.

5. Ausblick

Aktuell werden die ECM mit Lehrkräften pilotiert. Dabei wird untersucht wie Lehrkräfte das Material beurteilen und welche Schwächen und Stärken identifiziert werden können. Außerdem wird analysiert, ob die ECM edukativ für Lehrkräfte sind, indem das wahrgenommene PCK der Lehrkräfte untersucht wird.

Neben der Pilotierung mit Lehrkräften wird außerdem untersucht, ob die getroffenen Abwandlungen des Materials von Wildbichler auch im Regelunterricht dazu beitragen, das konzeptionelle Verständnis von Schüler:innen zu verbessern. Dafür wird die Unterrichtsreihe zunächst in einer Pilotierung in einer 8. Klasse durchgeführt und das konzeptionelle Verständnis bezüglich des Treibhauseffekts mit Hilfe des CCCI-422 von Schubatzky et al. (2023) in einem Prä-Post-Test-Design untersucht.

Im Anschluss an diese Pilotierungsphase werden die daraus generierten Einblicke genutzt, um das Material noch einmal weiterzuentwickeln. Ziel ist es, im Schuljahr 25/26 mit der Hauptuntersuchung zu beginnen.

6. Literatur

- Ball, D. & Cohen, D. K. (1996). Reform by the Book: What Is - or Might be - the Role of Curriculum Materials in Teacher Learning and Instructional Reform? *Educational Researcher*, 25(9), 6-8,14.
- Breuer, J., Vogelsang, C. & Reinhold, P. (2022). Nutzungsverhalten von Lehrkräften bei der Implementierung einer physikdidaktisch innovativen Unterrichtskonzeption. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 28(1).
- Budimaier, F. & Hopf, M. (2023). Alternative Darstellungsformen des Teilchenmodells. In C. Fridrich, B. Herzog-Punzenberger, H. Knecht, N. Kraker, P. Riegler & G. Wagner (Hrsg.), *Forschungsperspektiven 15*. 97–115. LIT Verlag. https://doi.org/10.52038/978364351139_8
- Davis, E. A., Palincsar, A. S., Smith, P. S., Arias, A. M. & Kademian, S. M. (2017). Educative Curriculum Materials: Uptake, Impact, and Implications for Research and Design. *Educational Researcher*, 46(6), 293–304.
- Hanuscin, D., Borda, E., Melton, J. & Mikeska, J. N. (2024). Designing Educative Curriculum Materials for Teacher Educators: Supporting Pre-service Elementary Teachers' Content Knowledge for Teaching About Matter and Its Interactions. *International Journal of Science and Mathematics Education*.
- Krajcik, J. & Delen, I. (2017). The Benefits and Limitations of Educative Curriculum Materials. *Journal of Science Teacher Education*, 28(1), 1–10.
- Kulgemeyer, C. (2018). Towards a framework for effective instructional explanations in science teaching. *Studies in Science Education*, 54(2), 109–139.
- Li, C. J., Monroe, M. C., Oxarart, A. & Ritchie, T. (2021). Building teachers' self-efficacy in teaching about climate change through educative curriculum and professional development. *Applied Environmental Education & Communication*, 20(1), 34–48.
- Mahler, D., Großschedl, J. & Harms, U. (2017). Using doubly latent multilevel analysis to elucidate relationships between science teachers' professional knowledge and students' performance. *International Journal of Science Education*, 39(2), 213–237.
- Mayer, R. E., & Moreno, R. (2003). Nine ways to reduce cognitive load in multimedia learning. *Educational Psychologist*, 38(1), 43–52.
- Obczovsky, M., Schubatzky, T. & Haagen-Schützenhöfer, C. (2023). Supporting

- Preservice Teachers in Analyzing Curriculum Materials. *Education Sciences*, 13(5), 518.
- Reinfried, S. & Tempelmann, S. (2014a). The Impact of Secondary School Students' Preconceptions on the Evolution of their Mental Models of the Greenhouse effect and Global Warming. *International Journal of Science Education*, 36(2), 304–333.
- Reinfried, S., & Tempelmann, S. (2014b). Wie Vorwissen das Lernen beeinflusst – Eine Lernprozessstudie zur Wissenskonstruktion des Treibhauseffekt-Konzepts. *Zeitschrift für Geographiedidaktik | Journal of Geography Education*, 42(1), S. 31–56. <https://doi.org/10.18452/23977>
- Remillard, J. T. (2005). Examining Key Concepts in Research on Teachers' Use of Mathematics Curricula. *Review of Educational Research*, 75(2), 211–246.
- Schneider, R. M. & Krajcik, J. (2002). Supporting Science Teacher Learning: The Role of Educative Curriculum Materials. *Journal of Science Teacher Education*, 13(3), 221–245.
- Schneider, R. M., Krajcik, J. & Blumenfeld, P. (2005). Enacting Reform-Based Science Materials: The Range of Teacher Enactments in Reform Classrooms. *Journal of Research in Science Teaching* 42(3). 283–312.
- Schubatzky, T., Haagen-Schützenhöfer, C., Wacker-
mann, R., Wöhlke, C. & Wildbichler, S. (2024). Navigating the complexities of student understanding: Exploring the coherency of students' conceptions about the greenhouse effect. *Science Education*, 108(4), 1134–1161.
- Schubatzky, T., Wacker-
mann, R., Wöhlke, C., Haagen-Schützenhöfer, C., Jedamski, M., Lindemann, H. & Cardinal, K. (2023). Entwicklung des Concept-Inventory CCCI-422 zu den naturwissenschaftlichen Grundlagen des Klimawandels. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 29(1).
- Shepardson, D. P., Roychoudhury, A., & Hirsch, A.S. (2017a). Using conceptual and physical models to develop students' mental models of the greenhouse effect. In D.P. Shepardson, A. Roychoudhury, & A.S. Hirsch (Eds.). *Teaching and learning about climate change. A framework for educators*. New York: Routledge. 85–105.
- Shepardson, D. P., Roychoudhury, A., Hirsch, A.S. & Top, S. M. (2017b). Students' Conception of a Climate System: Implications for Teaching and Learning. In D.P. Shepardson, A. Roychoudhury, & A.S. Hirsch (Eds.). *Teaching and learning about climate change. A framework for educators*. New York: Routledge. 69–84.
- Shulman, L. S. (1986). Those Who Understand: Knowledge Growth in Teaching. *Educational Researcher*, 15(2), 4–14.
- Varela, B., Sesto, V. & García-Rodeja, I. (2020). An Investigation of Secondary Students' Mental Models of Climate Change and the Greenhouse Effect. *Research in Science Education*, 50(2), 599–624.
- Wildbichler, S., Haagen-Schützenhöfer, C., Obezovsky, M. & Schubatzky, T. (2025/im Druck). Mit visuellen Repräsentationen über den Treibhauseffekt lernen.
- Wildbichler, S., Haagen-Schützenhöfer, C. & Schubatzky, T. (2024). Students' ideas about the scientific underpinnings of climate change: a systematic review of the literature. *Studies in Science Education*, 1–53.
- Wilhelm, T. & Schecker, H. (2018). Strategien für den Umgang mit Schülervorstellungen. In: Schecker, H., Wilhelm, T., Hopf, M. & Duit, R. (Hrsg.) (2018). *Schülervorstellungen und Physikunterricht. Ein Lehrbuch für Studium, Referendariat und Unterrichtspraxis*. Springer Spektrum. Berlin.
- Zloklikovits, S. & Hopf, M. (2021). Evaluating key ideas for teaching electromagnetic radiation. *Journal of Physics: Conference Series*, 1929(1), 12063. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1929/1/012063>

Implementation modularer Smartphone-Experimente im Physikunterricht

Marija Herdt, Heidrun Heinke

I. Physikalisches Institut IA, RWTH Aachen University
Sommerfeldstraße 16, 52074 Aachen
herdt@physik.rwth-aachen.de

Kurzfassung

Viele Lehrkräfte verfolgen bei der Implementation von Unterrichtsinnovationen an Schulen eine steinbruchartige und pragmatische Nutzung von zur Verfügung gestellten Unterrichtsmaterialien. Mit einem alternativen Implementationsansatz wird dem Rechnung getragen, um so die Akzeptanz für Innovationen nachhaltig zu erhöhen. Dies wird am Beispiel der kostenfreien App phyphox für den Physikunterricht der Sekundarstufe I umgesetzt, die den Einsatz von Smartphones und Tablets als mobile Messinstrumente ermöglicht. Zur breiten Implementation von Smartphone-Experimenten im schulischen Kontext wurden ein Unterrichtskonzept und Begleitmaterialien entwickelt, die in Kooperation mit Lehrkräften weiterentwickelt und in der Schulpraxis getestet werden. Das Unterrichtskonzept beinhaltet eine Einführungsstunde, welche durch einen modularen Lernzirkel Einblicke in die verschiedenen Sensoren des Smartphones und deren Nutzbarkeit in Experimenten liefert. Zusätzlich werden den Lehrkräften low-cost Experimentiersets bereitgestellt, welche Arbeitsblätter, Lehrkräftehandreichungen sowie das experimentelle Zubehör in Klassenstärke zu zahlreichen Schülerexperimenten aus verschiedenen lehrplanrelevanten Inhaltsfeldern enthalten. Diese können die Lehrkräfte nach eigenem Ermessen in ihren Unterricht integrieren. Der Ansatz soll einen niederschweligen Zugang zu einem breiteren unterrichtlichen Einsatz digitaler Messwerterfassung unter Nutzung von Smartphones ermöglichen. Eine Studie soll zeigen, inwiefern dieser Ansatz erfolgreich ist.

Abstract

When implementing teaching innovations in schools, many teachers take a piecemeal and pragmatic approach to using the provided teaching materials. An alternative implementation approach considers this challenge in order to sustainably increase the acceptance of innovations. This is implemented through the example of the free phyphox app, which supports secondary school physics lessons by turning smartphones into mobile measuring instruments. For the widespread implementation of smartphone experiments in schools, a teaching concept and accompanying materials have been developed. These are being further refined in collaboration with teachers and tested in real classroom settings. The teaching concept includes an introductory lesson using a modular learning cycle that provides insights into various smartphone sensors and their applicability in experiments. In addition, teachers are provided with low-cost experiment kits, containing worksheets, teacher handouts and experimental accessories for class-sized groups. These kits support numerous student experiments from different curriculum-relevant content areas, and teachers can integrate them into their lessons as needed. The approach aims to offer easy access to a broader use of digital data acquisition in the classroom using smartphones. A study aims to show to what extent this approach is successful.

1. Motivation

1.1 Status quo der Implementationsforschung

Wenn es darum geht, neue Unterrichtskonzepte in der Schule nachhaltig zu implementieren, wird der Prozess oft von verschiedenen Hindernissen begleitet, beispielsweise von einem hohen wahrgenommenen Aufwand, fehlenden Ressourcen oder einer fehlenden Passung zum Schulalltag. So neigen Lehrkräfte dazu, Innovationen pragmatisch zu nutzen und nur bestimmte Merkmale der vorgeschlagenen, teilweise komplexen Konzepte herauszugreifen. Außerdem bevorzugen sie explizite Anleitungen, die sich an curricularen Vorgaben orientieren. Zu diesen Ergebnissen

kommen ein Vergleich von 47 Implementierungsstudien unterschiedlicher Schulstufen und -typen aus Europa und den USA (vgl. Breuer et al., 2020) und eine Untersuchung des Zusammenspiels verschiedener Einflussfaktoren auf die Implementierung eines Unterrichtskonzepts zur Quantenmechanik in der Oberstufe (vgl. Breuer et al., 2022).

Auf diese Erkenntnisse kann mit einem symbiotischen Implementationsansatz (vgl. Gräsel & Parchmann, 2004) reagiert werden. Nach diesem Ansatz arbeiten unterschiedliche Experten an der Entwicklung und Umsetzung einer pädagogischen Innovation, was bedeutet, dass auch Lehrkräfte in die Gestaltung von Unterrichtskonzepten und -materialien durch Hoch-

schulen sowie in ihre Verbreitung integriert werden. Durch eine langfristige Zusammenarbeit und mehrfache Erprobungen und Revisions Schleifen wird eine Optimierung der Unterrichtsinnovation ermöglicht. Eine solche Kooperation wird auch deshalb als positiv beurteilt, weil es durch den Erfahrungsaustausch der Akteure zu einer Kompetenzerweiterung und Reflexion des Unterrichts kommt.

In der hier vorgestellten Studie soll die Strategie der symbiotischen Implementation am Beispiel einer Einbettung von Smartphone-Experimenten in den Physikunterricht umgesetzt werden. Dabei werden nachfolgend unter der Bezeichnung Smartphone-Experimente sowohl Experimente mit einem Smartphone als auch mit einem Tablet verstanden, bei denen auf die Daten geräteinterner Sensoren als digital erfasste Messwerte zurückgegriffen wird. Zur Implementation solcher Experimente werden neben Unterrichtskonzeptionen mit Arbeitsblättern und Lehrkräftehandreichungen auch Sets mit kostengünstigem Experimentiermaterial zur Verfügung gestellt.

1.2 Smartphone-Experimente

Smartphones (und Tablets) sind bereits ein elementarer Bestandteil des Alltags, besonders bei Jugendlichen. 93 % bzw. 59 % der Zwölf- bis 19-Jährigen in Deutschland besaßen 2024 ein eigenes Smartphone bzw. Tablet (vgl. JIM¹-Studie, 2024, S. 7). Ähnlich fallen die Werte bei der Angabe einer täglichen oder mehrfachen Nutzung pro Woche aus (vgl. ebd., S. 14). Auch in der Schule werden digitale Endgeräte vermehrt genutzt. An 39 % bzw. an 44 % der Gymnasien wird ein Smartphone bzw. Tablet täglich oder mehrmals pro Woche verwendet (vgl. JIM-Studie, 2023, S. 59).

Speziell für den naturwissenschaftlichen Unterricht kann die Verwendung von Smartphones und Tablets gewinnbringend sein. Hierfür kommen entsprechend dem DiKoLAN-Modell² u.a. Einsatzmöglichkeiten in den Kompetenzbereichen Messwert- und Datenerfassung sowie Datenverarbeitung in Frage (vgl. Becker et al., 2020). In diesen werden Fähigkeiten beschrieben, die in Bezug auf die Nutzung digitaler Werkzeuge und die Weiterverarbeitung und Analyse ihrer erfassten Daten als Basiskompetenzen gelten. Auch der Medienkompetenzrahmen NRW sieht vor, „[v]erschiedene digitale Werkzeuge und deren Funktionsumfang [zu] kennen, aus[zu]wählen sowie diese kreativ, reflektiert und zielgerichtet ein[zu]setzen“ (Medienberatung NRW, 2020).

Smartphone-Experimente bergen demnach ein großes und vielfältiges didaktisches Potenzial für den (Physik-)Unterricht und bieten zusätzlich vielfältige Möglichkeiten, diesen durch die Verknüpfung mit der Lebenswelt der SuS³ ansprechender zu gestalten. Für

diese Zwecke soll die App phyphox verwendet werden.

Phyphox (für „physical phone experiments“) ist eine im Jahr 2016 an der RWTH Aachen entwickelte kosten- und werbefreie App für Android und iOS, mit der über die Sensoren von Smartphones und Tablets (z. B. Beschleunigungssensor, Barometer, Gyroskop) physikalische Messdaten erfasst und ausgewertet werden können. Über die sowohl numerische als auch grafische Auswertung lässt sich die App für vielfältige Experimente im Bildungskontext nutzbar machen (vgl. Staacks, 2018a).

So können Nutzer:innen Rohdaten auslesen, vorgefertigte Experimente durchführen oder eigene Versuche im Web-Editor erstellen. Mit letzterem lässt sich der Schwierigkeitsgrad der Durchführung und Auswertung der Experimente an die Lerngruppe anpassen. Auch kann der Fokus beim Experimentieren von der Auswertung der Daten auf die Versuchsdurchführung selbst verlegt werden. Funktionen wie eine Fernsteuerung über den Webbrowser eines zweiten Gerätes oder eine Zeitautomatik erleichtern zudem die Durchführung der Experimente. Ziel der App ist es, wissenschaftliches Arbeiten niedrigschwellig zu vermitteln und das Interesse an Naturwissenschaften durch die Nutzung eines Alltagsgegenstandes (zum Teil in Alltagskontexten) zu fördern (vgl. Staacks, 2018b).

Die App ist seit ihrer Entwicklung in der Hochschullehre im Einsatz, wurde aber frühzeitig auch in zahlreichen Schulen genutzt. Darauf deuten u.a. die Installationszahlen hin, wonach phyphox bereits auf über neun Millionen Geräten (Stand Mai 2025) installiert wurde. Insbesondere die 4 Millionen sogenannten Volumeninstallationen, die seit September 2021 für iOS-Geräte separat ausgewiesen werden, sind ein Indiz dafür, dass phyphox auf vielen Schultablets vorhanden und somit als Standard-App im Bildungssystem angekommen ist. Sie schränken aber gleichzeitig auch die Verlässlichkeit der Aussagen zum Umfang des Einsatzes von phyphox deutlich ein. Aus der Öffentlichkeitsarbeit z.B. auf Bildungsmessen oder von Lehrkräftefortbildungen wissen wir, dass phyphox häufig bekannt ist, aber trotzdem nicht zwingend genutzt wird, da einigen Lehrkräften ein niederschwelliger Zugang fehlt. Diese Beobachtungen haben die hier vorgestellten Entwicklungen motiviert.

2. Ein niederschwelliger Zugang zu Smartphone-Experimenten mit dem phyphox:kit

Für einen niederschweligen Zugang zu einem unterrichtlichen Einsatz von Smartphones und Tablets als Experimentiermedium unter der Nutzung der App phyphox wurde ein Set von Materialien entwickelt, das sich an SuS ab der Mittelstufe richtet. Diese Materialien umfassen:

¹ JIM – Jugend, Information, Medien

² DiKoLAN – Digitale Kompetenzen für das Lehramt in den Naturwissenschaften

³ SuS – Schülerinnen und Schüler

- das Konzept für eine 90-minütige Einführungsstunde zum Kennenlernen der App und zur Schulung des Umgangs mit ihr,
- 15 modulare Arbeitsblätter zu exemplarischen Experimenten in verschiedenen, meist lehrplanrelevanten physikalischen Inhaltsfeldern mitsamt entsprechendem didaktischen Begleitmaterial wie Tipp- und Lösungskarten,
- wesentliche Teile des experimentellen Zubehörs zur Durchführung der Einführungsstunde und der weiteren Experimente, das in Klassensätzen zur Verfügung gestellt wird,
- eine Lehrkräftehandreichung, mit der sich Lehrkräfte einen Überblick über die Experimente und die ergänzenden Materialien verschaffen können.

Alle Bestandteile a) bis d) werden als sogenanntes phyphox:kit⁴ zusammengefasst.

Ausgehend von der Annahme, dass Smartphone-Experimente den Physikunterricht in vielfältiger Weise bereichern können, ist das Ziel des phyphox:kits, die Hürden bei der Implementation von Smartphone-gestützten Experimenten zu minimieren und ihren breiten Einsatz in Schulen zu fördern. Nachfolgend werden die einzelnen Bestandteile des phyphox:kits erneut detaillierter vorgestellt.

2.1 Einführungsstunde

Die Einführungsstunde bietet einen niederschweligen Einstieg in das Experimentieren mit Smartphones und Tablets unter Verwendung der App phyphox. Dabei stehen der Umgang mit der App und das Kennenlernen verschiedener Sensoren im Vordergrund. Die Einführung hat eine Dauer von 90 Minuten und ist in drei Phasen unterteilt (s. Abb. 1):

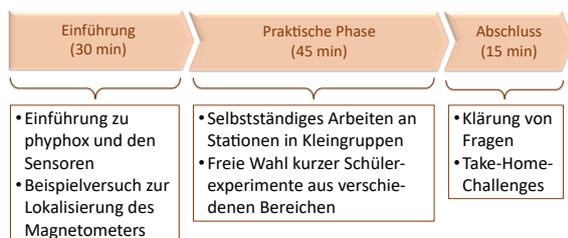


Abb. 1: Übersicht zum Ablauf der Einführungsstunde im phyphox:kit. Quelle: Eigene Darstellung.

1. Theoretische Einführung (ca. 30 min.):

In dieser Phase lernen die SuS den Umgang mit der App phyphox kennen, indem verschiedene Anwendungsmöglichkeiten der App im Alltag vorgestellt werden. Außerdem werden die in Smartphones typischerweise verbauten Sensoren behandelt, auf die phyphox zur Messwertaufnahme zugreifen kann, so

wie deren Funktionen im Alltag erläutert. Abschließend wird gemeinsam anhand eines Beispielversuchs zur Lokalisierung des Magnetfeldsensors am eigenen Gerät die grundsätzliche Bedienung der App erarbeitet.

2. Praktische Phase (ca. 45 min.):

Der Schwerpunkt der Einführungsstunde liegt auf der praktischen Phase, in der die SuS einen modularen Lernzirkel durchlaufen. In Kleingruppen durchlaufen sie selbstständig verschiedene Stationen, die sie frei auswählen und in ihrem eigenen Tempo bearbeiten können. Die bereitgestellten Experimente stellen die Bandbreite an Sensoren vor und sollen das Interesse der Lernenden wecken. Da sie vor allem verschiedene Optionen für Smartphone-Experimente dokumentieren sollen, sind sie inhaltlich nicht aufeinander abgestimmt. So wird es den SuS ermöglicht, die vielfältigen Funktionen der App kennenzulernen und erste praktische Erfahrungen im Umgang mit dieser zu sammeln.

3. Abschluss (ca. 15 min.):

Wegen des Lernzirkelcharakters und der inhaltlichen Heterogenität der einzelnen Experimente ist keine klassische Sicherung für die Stunde vorgesehen. Stattdessen werden offen gebliebene Fragen beantwortet. Außerdem werden den SuS sogenannte „Take-Home-Challenges“ mit auf den Weg gegeben, um sie dazu zu motivieren, in ihrer Freizeit die Welt außerhalb des Fachraumes mit einem für praktisch Jede:n verfügbaren mobilen Messgerät zu erforschen. Die im Rahmen der Challenges entstandenen Ergebnisse können von den SuS in den nächsten Unterrichtsstunden präsentiert werden.

Die Einführungsstunde kam bereits mehrfach zum Einsatz: Sie ist mit über 300 SuS aus den Jahrgangsstufen 7 bis 10 erprobt worden und wurde auch in diversen Lehrkräftefortbildungen vorgestellt und mit Lehrkräften diskutiert. Die Einführung erhielt dabei sowohl seitens der SuS als auch der Lehrkräfte positives Feedback (vgl. Herdt, 2024). Von Lehrkräften selbst ist die Einführungsstunde bisher jedoch noch nicht systematisch eingesetzt worden. Um dies zukünftig zu ermöglichen, wird eine kommentierte Präsentation sowie ein Ablaufplan im phyphox:kit zusammen mit dem wesentlichen experimentellen Material für die Lernzirkelstationen (siehe Abschnitt 2.4) zur Verfügung gestellt.

2.2 Arbeitsblätter zu den Experimenten

Im phyphox:kit sind Vorschläge und Materialien für insgesamt 16 Smartphone-Experimente für den Physikunterricht der Sekundarstufe I enthalten, wovon 14 Schülerexperimente sind, die lehrplanrelevanten⁵ Inhaltsfeldern zugeordnet werden können. Zwei weitere Experimente orientieren sich nicht an curricularen

⁴ Der vollständige Name des Materialsets heißt „phyphox:kit Basis Physik v1“. Es wird aber der Einfachheit halber hier als phyphox:kit bezeichnet.

⁵ Am Beispiel der Kernlehrpläne Physik für die Sekundarstufe I an Gymnasien und Gesamtschulen in NRW

Vorgaben, werden aber durch ihren spielerischen und motivierenden Charakter für den Einsatz im Lernzirkel der Einführungsstunde empfohlen.

Folgende Inhaltsfelder werden im phyphox:kit abgedeckt (hier exemplarisch nach dem Kernlehrplan Physik für Gymnasien in NRW, vgl. MSW NRW, 2019), wobei die Zahl in Klammern die Anzahl der beigefügten Experimente für das entsprechende Inhaltsfeld angibt:

- a) Elektrischer Strom und Magnetismus (1)
- b) Schall (5)
- c) Licht (1)
- d) Sterne und Weltall (2)
- e) Bewegung, Kraft und Energie (3)
- f) Druck und Auftrieb (2)

Die Arbeitsblätter sind simpel gehalten mit vielen anschaulichen Grafiken und beschränken sich auf maximal zwei Seiten. Lehrkräfte haben ihr übersichtliches und ansprechendes Layout positiv bewertet. Die Arbeitsblätter sind mit Creative-Commons-Lizenzen versehen und werden den Lehrkräften in editierbarer Version zur Verfügung gestellt.

2.3 Didaktisches Begleitmaterial

Das didaktische Begleitmaterial zu den Experimenten umfasst folgende Elemente:

- a) Lehrkräftehandreichung:

Die Handreichung dient Lehrkräften zur Orientierung über das phyphox:kit als Ganzes. Sie beinhaltet neben einer kurzen Erklärung, was phyphox ist, eine Übersicht über das bereitgestellte Material sowie über die Experimente, deren Inhalte kurz beschrieben werden. Weiter enthält sie Sicherheitshinweise und Handlungsempfehlungen zu den einzelnen Versuchen sowie die Einordnung der Experimente in die KMK⁶-Bildungsstandards und die Inhaltsfelder der Kernlehrpläne. Außerdem gibt die Handreichung Aufschluss über die Einführungsstunde.

- b) Tipps:

Um Differenzierungsmöglichkeiten zu ermöglichen, stehen zu einigen Arbeitsblättern Tippkarten zur Verfügung. Der Umgang mit diesen ist den Lehrkräften überlassen.

- c) Lösungen:

Zu Arbeitsblättern, in denen eine (Beispiel-)Lösung sinnvoll ist, wird auch diese in Form von Karten bereitgestellt. Auch hier können die Lehrkräfte nach eigenem Ermessen entscheiden, ob sie eine zentrale Sicherungsphase in ihre Unterrichtsstunde einbauen oder ob die SuS ihre Ergebnisse selbstständig überprüfen.

- d) Sensor-Steckbriefe:

Steckbriefe zu den von phyphox genutzten Sensoren sollen den Lehrkräften ermöglichen, Einblicke in die technischen Details sowie die Funktionsweisen der Sensoren zu erhalten. Außerdem können diese an interessierte SuS ausgehändigt werden. Die Steckbriefe werden laufend überarbeitet.

2.4 Experimentelles Zubehör

Zusätzlich zu den Arbeitsblättern und dem Begleitmaterial zu den Experimenten wird auch das wesentliche benötigte experimentelle Zubehör bereitgestellt. Dieses ist in Klassenstärke vorhanden, sodass bis zu 32 SuS in Partner- oder Gruppenarbeit an einem Experiment arbeiten können. Außerdem enthält das phyphox:kit Ersatzmaterial zu verschleißanfälligem Zubehör wie Maßbänder. Alle Materialien sind kostengünstige Alltagsgegenstände, die im Notfall ersetzt bzw. ergänzt werden können. Der Gesamtpreis eines phyphox:kits beläuft sich auf etwa 100 € (Stand Mai 2025).

3. Studiendesign

In einer fachdidaktischen Studie soll untersucht werden, inwiefern mithilfe des phyphox:kits die breite Implementierung von Smartphone-Experimenten in den Physikunterricht der Sekundarstufe I unterstützt werden kann. Dabei kommt ein Design-Based-Research-Ansatz zum Tragen (vgl. Reinmann, 2017). Die Studie geht dabei folgenden übergeordneten Fragen nach:

1. Welche Hindernisse treten bei der Einführung von Smartphone-Experimenten in den Physikunterricht auf und wie können diese überwunden werden?
2. Wie hoch ist die Akzeptanz von Smartphone-Experimenten bei Physiklehrkräften und wie kann sie nachhaltig gesteigert werden?

Das Studiendesign ist dabei im Sinne der symbiotischen Implementationsstrategie in mehrere Schritte unterteilt. Zunächst schließt es Lehrkräfteworkshops ein, in denen Prototypen erprobt, Rückmeldungen gesammelt und weitere, für die Schulpraxis relevante Anforderungen gemeinsam definiert werden. Zudem umfasst das Studiendesign die Implementationsstudie selbst mitsamt einer Pilot- und Hauptstudie.

3.1 Lehrkräfteworkshops

Gemäß des symbiotischen Implementationsansatzes wird das phyphox:kit in enger Zusammenarbeit mit Physiklehrkräften entwickelt. Dazu wird das konzipierte Kit mit allen zugehörigen Materialien in Lehrkräfteworkshops vorgestellt. Die Lehrkräfte können dabei alle Bereiche des Kits sichten und Feedback geben, welches beispielsweise in Form von schriftlichen

⁶ KMK – Kultusministerkonferenz

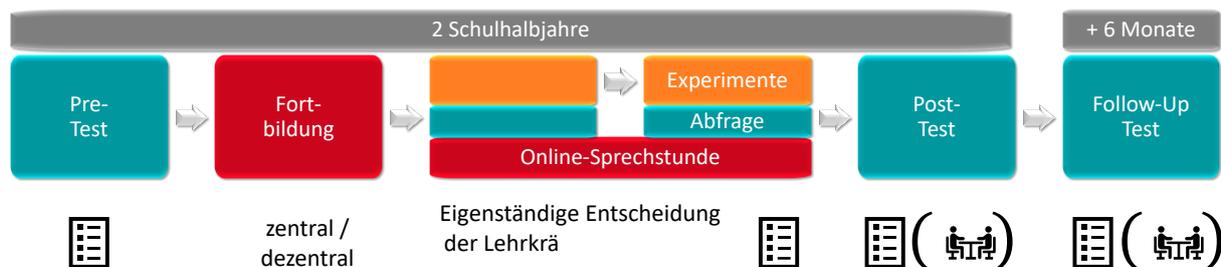


Abb. 2: Übersicht über den geplanten Ablauf der Implementationsstudie. Quelle: Eigene Darstellung.

Kommentaren auf den Arbeitsblättern oder dem Begleitmaterial gesammelt wird. Auch zur Einführungsstunde werden bestimmte Aspekte wie der Inhalt, die Struktur und die Umsetzungsmöglichkeiten in der Schulpraxis thematisiert. Mit Hilfe von Fragebögen werden außerdem die Einschätzungen der Lehrkräfte zu zwei Aspekten erfasst. Sie betreffen einerseits die wesentlichen Inhalte des phyphox:kits und vor allem das experimentelle Zubehör. Andererseits werden die Gestaltung der Sensor-Steckbriefe sowie der Umfang der Thematisierung der Funktionsweise der Sensoren hinterfragt. Zusätzlich werden zu gezielteren Fragen bezüglich der einzelnen Bereiche des phyphox:kits Antworten in Form eines Padlets gesammelt und in einer offenen Diskussionsrunde besprochen.

Der geplante Ablauf des Workshops hat sich bereits bei einer ersten Durchführung bewährt. Das Feedback aus diesem ersten und einem weiteren Workshop wird gesichtet und die entsprechenden Materialien werden so angepasst, dass die Änderungen bereits in die Pilotierung der Implementationsstudie einfließen können. Im Verlauf der Pilotierung soll mindestens ein weiterer Workshop stattfinden, in dem die teilnehmenden Lehrkräfte ihre Erfahrungsberichte zum ersten praktischen Einsatz im Unterricht teilen können.

3.2 Implementationsstudie

Die Studie befasst sich mit der Implementation von Smartphone-Experimenten in den Physikunterricht mithilfe des phyphox:kits und hat sowohl in der Pilotstudie als auch in der Hauptstudie eine Dauer von zwei Schulhalbjahren.

Die Pilotstudie findet an etwa 20 Schulen statt, wobei der Schwerpunkt auf Schulen aus NRW liegt. Sie beginnt zum Start des Schuljahrs 2025/26 und soll der Testung der Materialien und des Studiendesigns dienen. An einer Schule können eine oder mehrere Lehrkräfte an der Studie teilnehmen. Dies wird als wichtige Variable erfasst.

In der Hauptstudie soll das phyphox:kit an weitere etwa 60 Schulen versendet und die Studie dabei auf weitere Bundesländer ausgeweitet werden. Die Hauptstudie beginnt zum zweiten Halbjahr desselben Schuljahres 2025/26 und ist somit mit der Pilotstudie zeitlich verschränkt. Die Entscheidung für diesen Startzeitpunkt wurde in intensiver Abwägung von Pro- und Contra-Argumenten gefällt.

Für diesen Startzeitpunkt sprach, dass so schneller eine breitere Beteiligung von mehr Schulen in verschiedenen Bundesländern erreicht wird. Die thematische Vielfalt der bereitgestellten Materialien ermöglicht nach unserer Einschätzung auch eine Einführung im laufenden Schuljahr. Da die Hauptstudie ebenfalls zwei Schulhalbjahre abdecken soll, kann durch den Start eines neuen Schuljahres während der Durchführung der Studie unter Umständen auch die Einführungsstunde des Kits häufiger durchgeführt werden.

Gegen den frühen Startzeitpunkt der Hauptstudie sprach, dass die unterschiedlichen Rahmenbedingungen für die Pilot- und Hauptstudie im Sinne der Variablenkontrollstrategie verhindern können, dass die erhobenen Daten gemeinsam ausgewertet werden können. Zudem baut das jetzige Studiendesign darauf, dass bereits in der frühen Phase der Pilotstudie hinreichend viel hilfreiches Feedback von ihren Teilnehmer:innen gesammelt werden kann, so dass dieses noch für die Finalisierung der Materialien der Hauptstudie berücksichtigt werden kann. Dieses Argument wird aber durch die Vorarbeiten aus den vorbereitenden Lehrkräfte-Workshops abgemildert und kann zudem mit einer agilen Projektführung, die im Bedarfsfall auch noch die nachträgliche Änderung oder Ergänzung von Materialien ermöglicht, weiter abgeschwächt werden. Der schwerwiegendste Punkt war aus unserer Perspektive, dass beim Start der Hauptstudie die Ergebnisse der Pilotstudie zur Untersuchung der Akzeptanz der Smartphone-Experimente bei Physik-Lehrkräften noch nicht vorliegen und deshalb auch das Datenerhebungsinstrument noch nicht optimiert werden kann. Dieser Aspekt soll durch ein Mixed-Method-Design aufgefangen werden.

Der geplante Verlauf der Studie ist in Abbildung 2 dargestellt und wird im Folgenden beschrieben:

- a) Pre-Test:
Zu Beginn wird den Lehrkräften ein Pre-Test vorgelegt, in welchem die bisherigen Erfahrungen mit und die Akzeptanz von Smartphone-Experimenten gemäß dem Technology Acceptance Model (TAM) erfragt werden. Unter anderem wird dabei die wahrgenommene Nützlichkeit (Perceived Usefulness) und Bedienerfreundlichkeit (Perceived Ease of Use) der Technologie – in diesem Fall der Smartphones oder Tablets in Kombination mit der App phyphox als digitale Messgeräte – abgefragt. Außerdem werden Fra-

gen bezüglich der Einstellung zur Nutzung (Attitude Towards Usage) sowie die subjektiv gemessene Verhaltensabsicht (Behavioral Intention to Use) gestellt (vgl. Schorr, 2020).

b) Fortbildung:

In der Studie besteht für viele Lehrkräfte die Möglichkeit einer Fortbildung, in der sie das phyphox:kit mitsamt der Einführungsstunde kennenlernen können. Diese kann zentral oder auf Anfrage von Schulen in einigen Fällen auch dezentral stattfinden. Ein Teil der teilnehmenden Lehrkräfte wird nicht an Fortbildungen teilnehmen können, so dass die Lehrkräfte hinsichtlich der Fortbildungen in vier Kategorien eingeteilt werden können: (i) Fortbildungsteilnehmer:innen von Schulen, an denen mehrere Lehrkräfte an einer (i.d.R. dezentralen) Fortbildung teilgenommen haben, (ii) Fortbildungsteilnehmer:innen, die als einzige Lehrkraft ihrer Schule an einer Fortbildung teilgenommen haben, (iii) weitere Lehrkräfte von Schulen, von denen mindestens eine Lehrkraft an einer Fortbildung teilgenommen hat, (iv) Lehrkräfte von Schulen, von denen niemand an einer Fortbildung teilgenommen hat.

c) Einführung & Abfrage:

Die an der Studie beteiligten Lehrkräfte sollen zeitnah die Einführungsstunde in ihren Klassen durchführen, damit die SuS mit dem Umgang mit phyphox vertraut gemacht und auf den Einsatz von Smartphone-Experimenten im Unterricht vorbereitet werden. Die Lehrkräfte werden um ein kurzes Online-Feedback zur Durchführung der Einführungsstunde gebeten.

d) Experimente & Abfrage:

Den Lehrkräften stehen dann über die Dauer von zwei Schulhalbjahren die verschiedenen Experimente im phyphox:kit zur Verfügung, sodass sie über einen längeren Zeitraum die Möglichkeit haben, diese nach ihrer freien Wahl einzusetzen. Ein Einsatz wird dabei neben personalen Faktoren der Lehrkraft auch von äußeren Faktoren wie der zu unterrichtenden Klassenstufe und dem Schulcurriculum abhängen. Sobald ein Experiment im Unterricht durchgeführt wurde, sollen die Lehrkräfte auch hier eine kurze Online-Abfrage ausfüllen, in welcher Feedback zum Einsatz des Experiments im Unterricht erbeten wird.

e) Online-Sprechstunde:

Während der zwei Schulhalbjahre können Lehrkräfte Online-Sprechstunden wahrnehmen, in welchen sie Fragen bezüglich der Elemente im phyphox:kit stellen können. Dies betrifft sowohl die Einführungsstunde als auch die einzelnen Experimente.

f) Post-Test:

Am Ende der zwei Schulhalbjahre werden die Lehrkräfte gebeten, einen Post-Test auszufüllen.

Dieser ist ähnlich zum Pre-Test aufgebaut und soll etwaige Änderungen in der Akzeptanz von Smartphone-Experimenten festhalten. Außerdem besteht die Möglichkeit, sich für ein Interview zu melden, um weitere Details über die Erfahrungen mit dem phyphox:kit mitzuteilen.

g) Follow-Up Test:

Etwa sechs Monate nach Studienende werden die Lehrkräfte der Schulen erneut kontaktiert und um das Ausfüllen eines Follow-Up Tests gebeten. Die phyphox:kits verbleiben bis (mindestens) dahin in den Schulen. Mit dem Test wird die Nachhaltigkeit der (erwarteten) Implementation von Smartphone-Experimenten im Physikunterricht erfragt. Auch hier wird es die Möglichkeit zur Teilnahme an einem Interview geben.

4. Erste Rückmeldungen

Das bisher bei Bildungsmessen und in Fortbildungen bzw. einem Workshop erhaltene Feedback von Lehrkräften bestätigt, dass Lehrkräfte gerne Innovationen einsetzen würden, ihnen aber die benötigte Zeit zum Einarbeiten in ein neues Medium selbst oder zum Entwickeln von eigenen Unterrichtsmaterialien zu diesem fehlt. Außerdem ist die Bereitschaft, die auch bei low-cost Experimenten noch notwendigen Materialien in teils spärlich ausgestatteten Physiksammlungen selbstständig zusammenzusuchen oder zu beschaffen, angesichts vielfältiger Herausforderungen des Schulalltags häufig begrenzt. Deshalb hat das Konzept des phyphox:kits als kostengünstiges „ready-to-use“ Experimentierset einen positiven Eindruck bei Lehrkräften hinterlassen. Bisher haben bereits über 80 Schulen deutschlandweit Interesse am Kit selbst und an der Teilnahme an der Studie bekundet.

5. Literatur

- Becker, S.; Bruckermann, T.; Finger, A.; Huwer, J.; Kremser, E.; Meier, M.; Thoms, L.-J.; Thyssen, C. & von Kotzebue, L. (2020). DiKoLAN: Digitale Kompetenzen für das Lehramt in den Naturwissenschaften. Arbeitsgruppe Digitale Basiskompetenzen. Abgerufen am 06.06.2025 von <https://dikolan.de/>.
- Breuer, J.; Vogelsang, C. & Reinhold, P. (2020). Implementation und Nutzung von Unterrichtsmaterialien im schulischen Unterricht. Eine Bestandsaufnahme der mathematisch-naturwissenschaftlichen Fächer. In: *PhyDid A – Physik und Didaktik in Schule und Hochschule*, 19 (1), p. 12-22.
- Breuer, J.; Vogelsang, C. & Reinhold, P. (2022). Nutzungsverhalten von Lehrkräften bei der Implementierung einer physikdidaktisch innovativen Unterrichtskonzeption. *ZfDN* 28, 1 (2022). DOI: <https://doi.org/10.1007/s40573-022-00138-5>.
- Gräsel, C. & Parchmann, I. (2004): Implementationsforschung – oder: der steinige Weg, Unterricht zu verändern. In: *Unterrichtswissenschaft*, 32

- (3), S. 196-214. DOI: <https://doi.org/10.25656/01:5813>.
- Herd, M.; Hinkelmann, M. & Heinke, H. (2024). Konzipierung und Erprobung einer Einführung in das Experimentieren mit der App phyphox. In: PhyDid B - Didaktik Der Physik - Beiträge Zur DPG-Frühjahrstagung, 1 (1), p. 243-248.
- JIM-Studie; Medienpädagogischer Forschungsverbund Südwest (2023). JIM-Studie 2023 - Jugend, Information, Medien. Abgerufen am 06.06.2025 von https://mpfs.de/app/uploads/2024/10/JIM_2023_web_final_kor.pdf.
- JIM-Studie; Medienpädagogischer Forschungsverbund Südwest (2024). JIM-Studie 2024 - Jugend, Information, Medien. Abgerufen am 13.05.2025 von https://mpfs.de/app/uploads/2024/11/JIM_2024_PDF_barrierearm.pdf.
- Medienberatung NRW (2020). Medienkompetenzrahmen NRW. Abgerufen am 06.06.2025 von https://medienkompetenzrahmen.nrw/fileadmin/pdf/LVR_ZMB_MKR_Rahmen_A4_2020_03_Final.pdf.
- MSW NRW; Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen (2019). Kernlehrplan für die Sekundarstufe I Gymnasium in Nordrhein-Westfalen – Physik. 1. Auflage. Düsseldorf: Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen.
- Reinmann, G. (2017). Design-based Research. In: Schemme, D. & Novak, H. (Hrsg.). Gestaltungsorientierte Forschung – Basis für soziale Innovationen. Erprobte Ansätze im Zusammenwirken von Wissenschaft und Praxis, S. 49-61. Bielefeld: Bertelsmann.
- Schorr, A. (2020). Skala zur Erfassung der Digitalen Technologieakzeptanz – Weiterentwicklung zum testtheoretisch geprüften Instrument (Scale for measuring digital technology acceptance. Further development and testing of the scale based on classical testing theory). In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (Hg.), Digitale Arbeit, digitaler Wandel, digitaler Mensch? 66. Kongress für Arbeitswissenschaft (S. 1-7). Dortmund: GfA-Press.
- Staacks, S.; Heinke, H. & Stampfer, C. (2018a). Smarte Experimente. In: Physik Journal, 17 (11), S. 35-38. Weinheim: WILEY-VCH.
- Staacks, S.; Hütz, S.; Heinke, H. & Stampfer, C. (2018b). Advanced tools for smartphone-based experiments: phyphox. In: Physics Education, 53. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6552/aac05e>.

Konzipierung eines Workshops im MLeNa-Programm

- MINT-Lehrkräfte von morgen fördern -

Peer Bruns*, Christina Lüders*, Maria Hinkelmann*, Tobias Winkens*, Heidrun Heinke*

*I. Physikalisches Institut IA, RWTH Aachen University
Sommerfeldstraße 16, 52074 Aachen
peer.bruns@rwth-aachen.de

Kurzfassung

„Magie oder MINT?“ ist ein zweitägiger Workshop zur Interessenförderung an MINT-Themen, der für das Programm MLeNa zur MINT-Lehrkräfte-Nachwuchsförderung konzipiert und entwickelt wurde. In dem Workshop sollen Schüler*innen der Oberstufe, die Interesse am Lehrberuf im MINT-Bereich haben, die Möglichkeit bekommen, selbst einen kurzen Kurs zu planen und diesen dann an ihrer eigenen Schule mit Schüler*innen der Unterstufe durchzuführen. Unter Anleitung durch Tutor*innen können die Oberstufenschüler*innen eigenständig Material entwickeln und ein Kurskonzept entwerfen. Um das Interesse sowohl der Unterstufen-Schüler*innen als auch das der Oberstufen-Schüler*innen anzusprechen, sollen ausgewählte magische Tricks unter dem Einsatz des forschenden Lernens durch Wissen aus dem MINT-Bereich erklärt werden. Als Grundlage der Konzipierung des Workshops wurde eine Bedarfsanalyse mit am MLeNa-Programm teilnehmenden Oberstufenschüler*innen durchgeführt. Konzeptionell wurde der Workshop in insgesamt 6 Bausteine aufgeteilt, welche sich an den nine events of instruction von Robert Gagné (Gagné & Briggs, 1974) orientieren.

1. Motivation

Seit Jahren schon zeichnet sich sowohl ein MINT¹-Lehrkräfte-Mangel (Ebner, 2023) als auch ein MINT-Fachkräfte-Mangel (Bünning et al., 2020) ab. Dabei ist die große Bedeutung von Fachkräften im MINT-Bereich, und damit einhergehend die von MINT-Lehrkräften, nicht von der Hand zu weisen (Anger et al., 2017). Somit muss der Aufgabe, diesen Mängeln entgegenzuwirken, eine große Bedeutung beigemessen werden.

Das MLeNa-Programm zur MINT-Lehrkräfte-Nachwuchsförderung ist ein Programm, das sich primär dem lehramtsbezogenen Teil dieses Problems widmet (Schorn und Heinke, 2018, MLeNa-Website (o. D.)). Indirekt und mittelfristig kann das Programm aber auch helfen, durch die Stärkung des MINT-Interesses bei jüngeren Schüler*innen den MINT-Fachkräfte-Mangel zu lindern. Der hier vorgestellte Workshop für Schüler*innen, die an dem Programm teilnehmen, soll hierbei auf zwei Arten unterstützen:

- a) Schüler*innen der Oberstufe, die Interesse haben, nach der Schule ein Lehramtsstudium zu beginnen, soll ein realistischer Einblick in den Beruf einer Lehrkraft ermöglicht werden. Sie sollen eine Gelegenheit erhalten, einen kompletten Kurs aus vier 90-minütigen Einheiten unter Anleitung zu planen und ihn dann selbstständig mit Schüler*innen der Unterstufe durchführen zu können. Hierdurch soll zum einen die Begeisterung gesteigert werden, ein Studium im MINT-Lehramt zu beginnen, und zum anderen soll durch das Ermöglichen

einer realistischen Einschätzung des Lehrberufs späteren Studienabbrüchen aus Uninformiertheit präventiv vorgebeugt werden.

- b) Bei Schüler*innen der Unterstufe soll durch den von den Oberstufenschüler*innen mit ihnen durchgeführten Kurs das Interesse an MINT-Themen gefördert werden.

Um beide Ziele erreichen zu können, wurde als thematischer Schwerpunkt des Kurses das Thema Magie gewählt. Dies soll sowohl das Interesse von Oberstufen- als auch von Unterstufenschüler*innen ansprechen. Zusätzlich soll die Umsetzung des Kurses nach dem Prinzip des Forschenden Lernens (Oyler, 2018) unter Einbindung von peer tutoring (Galbraith und Winterbottom, 2011) zur Interessenförderung beitragen.

2. MLeNa – Ein Programm zur MINT-Lehrkräfte-Nachwuchsförderung

Um dem angesprochenen Bedarf an qualifizierten Lehrkräften gerecht zu werden, gibt es verschiedene Programme, Projekte und Initiativen, die den Nachwuchs an MINT-Lehrkräften fördern sollen. Eines dieser Programme ist MLeNa, dessen Name für MINT-Lehrkräfte-Nachwuchsförderung steht.

Das MLeNa-Programm existiert seit 2013 (Schorn und Heinke, 2018) und ist auf Schüler*innen der Oberstufe ausgerichtet, die Interesse am MINT-Lehramt haben. Ihnen soll durch die Teilnahme am Programm ein vertiefter Einblick in den MINT-Lehrkräfteberuf und somit eine bewusste

¹ MINT – Mathematik, Informatik, Naturwissenschaften, Technik

Studienwahl für ein MINT-Lehramtsstudium ermöglicht werden (ebd.).

Den Schüler*innen soll die Möglichkeit gegeben werden, eigene Lehrerfahrungen zu sammeln und zu reflektieren. Hierfür werden Workshops, Treffen mit Studierenden und anderen Interessierten, eine Exkursion und verschiedene andere Aktionen angeboten (MILeNa-Website (o. D.)).

Nach einem grundlegenden Auftakt mit einem Basisworkshop erhalten die Schüler*innen die Möglichkeit, unter Anleitung an ihrer eigenen Schule erste Lehrtätigkeiten zu übernehmen (Schorn und Heinke, 2018). Zusätzlich können sie an freiwilligen Angeboten in Form von Wahlworkshops teilnehmen. Diese dauern meist wenige Stunden und behandeln verschiedene tiefere Themen. Im Rahmen von Wahlworkshops soll auch der im Folgenden vorgestellte Workshop angeboten werden. Im Gegensatz zu dem bisherigen Format von Wahlworkshops wird der hier erstellte Workshop als zweitägiger Übernachtungs-Workshop konzipiert. Hierdurch wird eine Betrachtung der Freizeitgestaltung relevant.

3. Bedarfsanalyse

Um den Workshop bestmöglich an die Interessen und Wünsche der Schüler*innen als künftige Teilnehmer*innen anpassen zu können, wurde vor der Konzeption des Workshops eine Bedarfsanalyse mit Hilfe einer Fragebogenerhebung durchgeführt.

3.1. Fragebogenerstellung

Für eine klare Strukturierung wurden die Items zu dem Workshop im Fragebogen in drei Oberkategorien aufgeteilt: Anfangsphase des Workshops, die Zeit während des Workshops und die Freizeitgestaltung. Zusätzlich wurden soziodemografische Informationen wie Geschlecht, Schulform und Klassenstufe abgefragt. Zu jeder Oberkategorie wurden je zwei allgemein gehaltene Fragen gestellt:

a) „Was wünschst du dir von ...?“

Was wünschst du dir von dem Start eines Wochenend-Workshops?

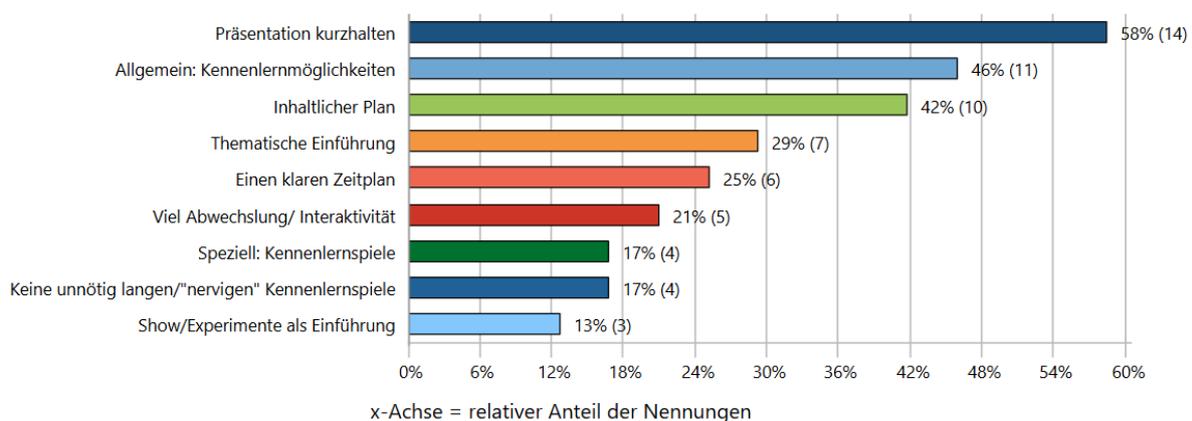


Abb. 1: Ergebnisse der Antworten von N=26 Schüler*innen auf die Fragen „Was wünschst du dir von dem Start eines Wochenend-Workshops?“ und „Auf Folgendes könnte ich in Bezug auf den Start eines Wochenend-Workshops verzichten“. Es wird die jeweilige Häufigkeit der gegebenen Antworten angezeigt. Alle Antworten, die weniger als dreimal gegeben wurden, sind nicht aufgeführt. (Eigene Darstellung)

b) „Auf Folgendes könnte ich im Bezug auf ... verzichten.“

Insgesamt wurden neun Fragen mit Freitext-Antwort, zwei Items mit einer 11-stufigen Likert-Skala und eine Frage mit Mehrfach-Antwort-Möglichkeit gestellt. Dabei sollte der Fragebogen in weniger als zehn Minuten beantwortet werden können.

3.2. Durchführung

Die Bedarfsanalyse wurde auf der MILeNa-Abschlusskursion 2024 durchgeführt. Dabei wurden insgesamt 27 Schüler*innen befragt, welche das Programm MILeNa bereits vollständig durchlaufen haben und somit qualifiziert erscheinen, die Wünsche und Interessen zukünftiger Programmteilnehmer*innen zu vertreten.

Für die Befragung erhielten die Schüler*innen einen Flyer mit Informationen zu dem geplanten Workshop und einem QR-Code, über welchen sie mit ihrem Handy an der Umfrage teilnehmen konnten. Es wurde eine durchschnittliche Bearbeitungsdauer von ca. 8 Minuten erfasst.

3.3. Ergebnisse

Bei der Auswertung der Antworten der Schüler*innen ließen sich folgende Ergebnisse als wichtigste Wünsche und Interessen feststellen:

Abbildung 1 zeigt die Ergebnisse der Umfrage auf die Fragen zur Anfangsphase des Workshops. Dabei werden neben den Rückmeldungen zu den Wünschen auch die Antworten auf die Frage, worauf die Teilnehmer*innen verzichten würden als negativ formulierte Aspekte mit in der Grafik angezeigt.

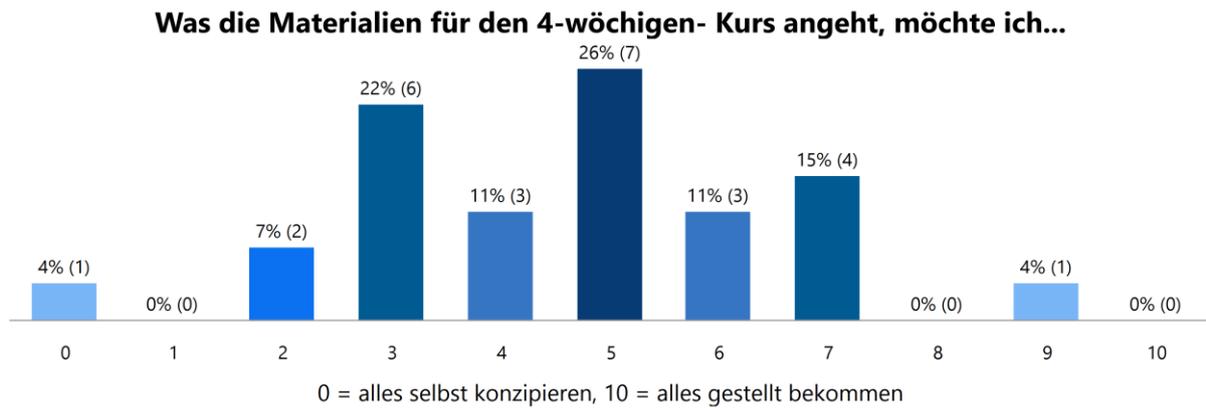


Abb. 2: Ergebnisse der Antworten von N=27 Schüler*innen auf die Frage „Was die Materialien für den 4-wöchigen- Kurs angeht, möchte ich alles selbst konzipieren/gestellt bekommen“. Es wird die jeweilige Häufigkeit der gegebenen Antworten angezeigt. (Eigene Darstellung)

Wie zu sehen ist, wird sich vor allem eine Einführungspräsentation gewünscht, in welcher der geplante zeitliche und inhaltliche Ablauf des Workshops klar kommuniziert wird. Allerdings soll darauf geachtet werden, dass diese Präsentation zeitlich eher kurzgehalten werden soll. Zusätzlich soll Zeit eingeplant werden, in welcher die Schüler*innen sich gegenseitig kennenlernen können. Allerdings wurde hier auch mehrfach angesprochen, keine „nervigen“ oder „unnötig langen“ Kennenlernspiele einzubauen.

Für die Durchführung des Workshops soll den Ergebnissen der Befragung zufolge ein möglichst hoher Anteil an Eigenbeteiligung der Teilnehmer*innen eingeplant werden. Die Aufgaben sollen abwechslungsreich gestellt sein und es sollen viele Experimente durchgeführt werden können. Zusätzlich wurden Pausen und eine lockere Handhabung der Zeitgestaltung statt eines strengen Ablaufplans angesprochen. In Bezug auf die MINT-Fächer gaben die meisten Schüler*innen an, sich am meisten für Inhalte aus der Physik und Chemie zu interessieren.

Eine Frage mit großer Bedeutung für die Konzipierung des Workshops war folgende: „Was die Materialien für den 4-wöchigen Kurs angeht, möchte ich alles selbst konzipieren/gestellt bekommen“. Zur Beantwortung wurde eine 11-stufige Skala vom Likert-Typ von „alles selbst konzipieren“ bis „alles gestellt bekommen“ vorgegeben, auf welcher die Teilnehmer*innen die für sie am ehesten zutreffende Stelle ankreuzen sollten. Das Ergebnis der Beantwortungen dieser Frage ist in Abbildung 2 zu sehen. Es ist erkennbar, dass die Verteilung keine klare Präferenz der Mehrheit für eine der beiden Optionen zeigt. Als Konsequenz kann gefolgert werden, dass eine gleichmäßige Gewichtung von „selbst konzipieren“ und „gestellt bekommen“ der Materialien, aus Sicht der Schüler*innen gewünscht wird. Dies spricht für die Ermöglichung eines individuell wählbaren Anteils an vorgefertigten Materialien.

Die Fragen zur Gestaltung der Freizeitphasen in Pausen und am Abend wurden von über der Hälfte der Personen mit „privat“ beantwortet. Eine Gestaltung

der Freizeit in der Gruppe wurde dagegen nur von etwas über einem Viertel der Proband*innen genannt. Eine weitere Rückmeldung, welche häufiger genannt wurde, war das Verlassen des Durchführungsortes, um in die Natur oder in die Stadt zu gehen.

4. Konzipierung des Workshops „Magie oder MINT?“

4.1. Rahmenbedingungen des Workshops

Der Workshop soll als Wahlworkshop für das MILENa-Programm konzipiert sein. Dementsprechend ist er auf Schüler*innen der Oberstufe als Zielgruppe ausgerichtet. Zusätzlich soll der Workshop als Wochenend-Workshop, also zweitägig, mit einer gemeinsamen Übernachtung (z. B. in einer Jugendherberge) geplant werden. Dies hat als Ziel, dass so zum einen mehr Zeit für die Erarbeitung der Inhalte ermöglicht wird, weil Fahrzeiten reduziert werden können, und zum anderen die Schüler*innen im Rahmen des Wahlworkshops stärker die Möglichkeit für einen Austausch und zur Vernetzung untereinander haben.

Der während des Workshops von den Teilnehmer*innen erstellte Kurs für jüngere Schüler*innen soll nach dem Ende des Workshops von ihnen an ihrer eigenen Schule umgesetzt werden. Das Format des Kurses soll dabei einer AG ähneln, die als freiwillig wählbare Veranstaltung angeboten wird. Der Kurs kann beispielsweise an vier Terminen mit einer Länge von 60 bis 90 Minuten in (idealerweise) aufeinanderfolgenden Wochen stattfinden. Wichtig für die Erstellung des Kurses ist ebenfalls die Orientierung daran, dass der Kurs mit Schüler*innen der Unterstufe durchgeführt werden soll.

4.2. Workshop-Inhalte

Inhaltlich soll der Workshop drei Hauptaspekte behandeln: die Auffrischung von Vorwissen, die eigenständige Entwicklung des Kurses und die Vorbereitung darauf, diesen Kurs in der Schule durchzuführen.

Im ersten Abschnitt des Workshops soll bereits erworbenes Vorwissen reaktiviert werden, welches für die Konzeption des Kurses (wie die Erstellung von Arbeitsblättern oder Lernzirkeln) genutzt werden kann. Dieses Vorwissen kann zum Beispiel in dem Basisworkshop oder durch schulische Angebote erlernt worden sein. Sobald das notwendige Vorwissen aufgearbeitet ist, erhalten die Schüler*innen die Möglichkeit, mit Unterstützung von bereitgestellten Materialien und Tutor*innen einen eigenen Kurs für Schüler*innen der Unterstufe zu erstellen.

Im Verlauf des Workshops sollen zusätzlich Fragen zur Umsetzung des Kurses in der Schule geklärt werden können. Damit wird angestrebt, dass die Schüler*innen am Ende des Workshops gut auf die eigenständige Durchführung des Kurses vorbereitet sind.

4.3. Sozialer Aspekt des Workshops

Mit Blick auf den sozialen Charakter soll der Workshop ebenfalls auf mehreren Ebenen ansetzen. Allgemein soll sich das Ziel von MILENa auch im Workshop widerspiegeln. Die Schüler*innen sollen dementsprechend Freude am Entwickeln von Unterrichtsmaterialien erfahren.

Zusätzlich soll erreicht werden, dass die Schüler*innen Spaß am Programm MILENa allgemein erleben und die Möglichkeit erhalten sich mit anderen Teilnehmer*innen auszutauschen.

5. Grundstruktur des Workshops

Die Struktur des Workshops orientiert sich an den nine events of instruction von Robert Gagné (Gagné & Briggs, 1974), die in Abbildung 3 dargestellt sind.

Gagné strukturiert lernförderlichen Unterricht in neun Phasen, welche sich an den Phasen des Lernens orientieren. Diese neun Phasen werden für den Workshop in sechs Bausteine zusammengefasst. Dadurch können die Bausteine bei Bedarf einzeln ausgetauscht, verkürzt, verlängert oder alternativ kombiniert werden. Aus folgenden Bausteinen setzt sich der Workshop zusammen:

- Baustein I: Einführung
- Baustein II: Wiederholung
- Baustein III: Experimente

- Baustein IV: Kurstage erstellen
- Baustein V: Rückmeldung
- Baustein VI: Durchführung

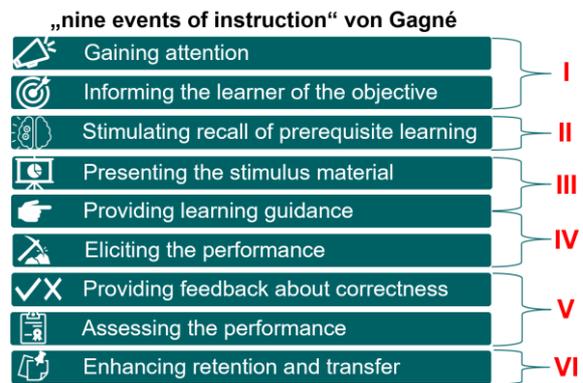


Abb. 3: Orientierung der Workshop-Bausteine an den nine events of instruction von Gagné (Gagné & Briggs, 1974). (Eigene Darstellung)

Die Verteilung der nine events of instruction auf die sechs Bausteine ist in Abbildung 3 zu sehen. Abbildung 4 zeigt die zeitliche Aufteilung der Bausteine im Workshop sowie in der Schule.

6. Die Bausteine des Workshops

6.1. Baustein I: Einführung

Der erste Baustein ist auf Grundlage der Events gaining attention (Gagné & Briggs, 1974, S.157f) und informing learner of the objective (ebd., S. 158f) erstellt worden. In diesem Baustein sollen die Teilnehmer*innen zuerst einmal im Kurs ankommen und ihr Interesse für die auf sie zukommenden Themen soll geweckt und verstärkt werden. Außerdem sollen sie über die Planung des Workshops und dessen genaue Ziele aufgeklärt werden.

Auf dieser Grundlage und den Ergebnissen der Bedarfsanalyse wurden für Baustein I die folgenden Inhalte festgelegt:

- Möglichkeiten zum gegenseitigen Kennenlernen
- Interesse wecken (z.B. durch Experimente)
- Eine Präsentation mit Strukturinformationen



Abb. 4: Zeitliche Aufteilung der Bausteine: Die Bausteine I bis V werden im Workshop durchgeführt, Baustein VI wird nach dem Ende des Workshops von den Teilnehmer*innen in der Schule mit Schüler*innen der Unterstufe durchgeführt. (Eigene Darstellung)

Die Präsentation mit Strukturinformation soll dabei folgende Punkte enthalten:

- Zeitlicher Plan
- Thematischer Überblick
- Lernziele des Workshops
- Thematische Einführung

Insgesamt ist für den Baustein ein zeitlicher Rahmen von 45-60 Minuten angesetzt.

6.2. Baustein II: Wiederholung

In dem zweiten Baustein sollen alle für die spätere Arbeit an den Kursen nützlichen Lehrmethoden, -medien und Tools wiederholt werden, welche die Teilnehmer*innen schon in dem Basisworkshop am Beginn des MILENa-Programms oder in anderen Veranstaltungen kennengelernt haben. Als Beispiele lassen sich das Experimentieren mit Schüler*innen, das Erstellen von Arbeitsblättern oder das Lernen an Stationen nennen. Hierdurch wird die Kurserstellung in Baustein IV vorbereitet, sodass alle Teilnehmer*innen ähnliche und die notwendigen Voraussetzungen haben.

Dieser Schritt entspricht dem stimulating recall of prerequisite learning (Gagné & Briggs 1974, S. 159), dem dritten Lern-Event nach Gagné.

Ein besonderer Fokus der Wiederholung der Methoden soll auf der Verwirklichung des Prinzips des forschenden Lernens (Oyler, 2018) liegen. Dieses Prinzip soll in Baustein IV als didaktische Grundlage für die Erstellung der Kurse dienen.

6.3. Baustein III: Experimente

Die Events presenting the stimulus material (Gagné und Briggs, 1974, S.159f) und providing learning guidance (ebd., S. 161f) werden beide in Baustein III behandelt. Nach der Reaktivierung des Vorwissens in Baustein II sollen die Teilnehmer*innen in diesem Baustein mit den Lerninhalten konfrontiert werden. Der Lerninhalt sind in diesem Workshop die Experimente, welche in Baustein IV als Inhalt der zu erstellenden Kurse genutzt werden sollen.

Die Teilnehmer*innen dürfen in diesem Baustein Hands-On-Experimente² in Kleingruppen eigenständig durchführen. Die Experimente sind dabei als kleine magische Tricks gestaltet und können von einer Person der Gruppe mit Hilfe einer Anleitung den anderen vorgeführt werden. Im Anschluss haben die Teilnehmer*innen Zeit in ihrer Gruppe über Erklärungsansätze zu diskutieren und Theorien aufzustellen. Sollten sie eigenständig nicht zu einer Lösung kommen, stehen ihnen Hilfekarten mit zunehmendem Hilfeegrad sowie die Tutor*innen zur Verfügung. Zur Überprüfung der eigenen Ansätze und Theorien erhalten die Teilnehmer*innen ebenfalls eine

Auflösung mit einer wissenschaftlich korrekten Erklärung des zu beobachtenden Phänomens.

Da der in Baustein IV zu konzipierende Kurs aus vier Terminen bestehen soll, sollten die Teilnehmer*innen in diesem Baustein mindestens vier verschiedene Experimente durchführen, um eine ausreichend breite inhaltliche Grundlage für die Kurse zur Verfügung zu haben. Der Gedanke hierbei ist, dass der Inhalt in den Kursen deutlich sicherer präsentiert und die Experimente deutlich effizienter durchgeführt werden können, wenn die Oberstufen-Schüler*innen die Experimente alle selbst bereits mindestens einmal durchgeführt haben. Um das möglichst gut gewährleisten zu können, ist für diesen Baustein eine Zeit von 90 Minuten eingeplant.

6.4. Baustein IV: Kurse erstellen

Baustein IV greift erneut das Event providing learning guidance auf. Zusätzlich wird in diesem Baustein auch das Event eliciting the performance (ebd., S. 162) durchgeführt. In diesem Baustein wird den Teilnehmer*innen der höchste Anteil eigener Arbeitszeit des Workshops ermöglicht. Sie erhalten 180 Minuten, in welchen sie sich ihre Zeit größtenteils frei einteilen können. In dieser Zeit sollen sie, angeleitet durch die Tutor*innen und mit Hilfe verschiedener Unterstützungen, ihre eigenen Kurse zum Thema „Magie oder MINT?“ erstellen. Abbildung 5 zeigt eine Auswahl der dabei zur Verfügung gestellten Hilfsmaterialien.

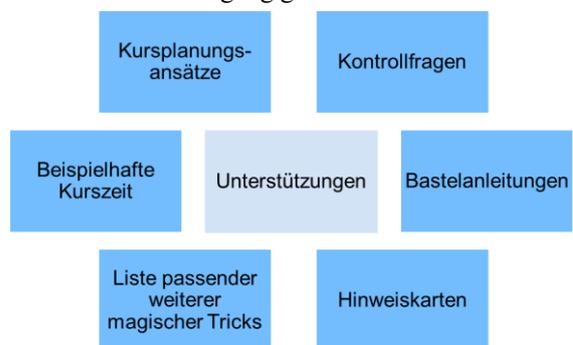


Abb. 5: Verschiedene Hilfsmaterialien, welche den Teilnehmer*innen in Baustein IV zur Unterstützung der Gestaltung eigener Kurse zur Verfügung gestellt werden. (Eigene Darstellung)

Insgesamt sollen vier Kurszeiten erstellt werden, welche zeitlich je nach den Gegebenheiten der Schulen 60-90 Minuten umfassen. Für die inhaltliche Gestaltung sollen die in Baustein III durchgeführten Experimente mit dem forschenden Lernen als didaktische Grundlage aufgearbeitet werden.

Unterstützend erhalten die Teilnehmer*innen eine bereits fertig ausgearbeitete Kurszeit, welche sie als Inspiration nutzen oder an welcher sie sich ggfs. auch orientieren können. Zusätzlich erhalten sie Listen mit verschiedenen Kursplanungsansätzen und

² Hands-On-Experimente – hier als Experimente mit alltäglichen Materialien verstanden, welche von den Lernenden selbst durchgeführt werden können

Kontrollfragen, anhand welcher man prüfen kann, ob in einem selbst entwickelten Kurs noch etwas fehlt, und eine Liste mit verschiedenen magischen Tricks, welche zum gleichen MINT-Thema passen wie das Haupt-Experiment. Weiter werden andere Unterlagen, wie Bastelanleitungen, Hinweiskarten etc. zu den in Baustein III durchgeführten Experimenten bereitgestellt. Die Teilnehmer*innen erhalten hierbei, wie in der Bedarfsanalyse gewünscht, selbst die Wahl, welche und wie viele der vorgefertigten Materialien sie nutzen wollen.

6.5. Baustein V: Rückmeldung

Nach der Kurserstellung erhalten die Teilnehmer*innen in diesem Baustein die Möglichkeit, ihre eigenen Kurse den anderen in kleinen Gruppen zu präsentieren. Nach Gagné bedient dieser Baustein die Events providing feedback about correctness (Gagné & Briggs, 1974, S. 163) und assessing the performance (ebd., S. 163f).

Nach der Präsentation der von ihnen aufbereiteten Inhalte einer Kurszeit erhalten die Mitglieder der Gruppe die Möglichkeit, sich gegenseitig Feedback zu geben. Hierdurch sollen alle Anwesenden weiteren Input zu der Gestaltung des diskutierten Kurses, damit aber gleichzeitig auch weitere Ideen für die Gestaltung ihrer eigenen Kurszeiten erhalten.

Die Durchführung dieses Bausteins in peer-to-peer-Form soll eine geschützte, nicht-wertende Atmosphäre bieten, in der jede Person sich frei äußern kann. Zusätzlich sollen somit die Lernmöglichkeiten aller Beteiligten im Gespräch maximiert werden.

6.6. Baustein VI: Durchführung

Der letzte Baustein umfasst die Durchführung des erstellten Kurses durch die Teilnehmer*innen an ihren eigenen Schulen und ist somit nicht mehr direkter Teil des Workshops.

Durch die in der Durchführung des Kurses implizit stattfindende Wiederholung der im Workshop gelernten Inhalte und die Reflexion des Workshops spiegelt dieser Baustein das letzte Event enhancing retention and transfer (ebd., S. 164f) wider.

7. Zusammenfassung und Ausblick

„Magie oder MINT“ ist ein Workshop für das Programm MLeNa. Dieser soll als zweitägiger Wahlworkshop mit Übernachtung angeboten werden und das Interesse am MINT-Lehramtsberuf bei Oberstufenschüler*innen steigern. Es wurde eine Bedarfsanalyse mit Teilnehmer*innen des MLeNa-Programms mit den folgenden wichtigsten Ergebnissen durchgeführt: Für den Start des Workshops wünschen sich die Teilnehmer*innen eine kurze Einführungspräsentation mit einem zeitlichen und inhaltlichen Strukturplan des Workshops. Außerdem soll Zeit eingeplant werden, in der die Teilnehmer*innen sich gegenseitig kennenlernen können. Während des Workshops sollen möglichst viele interaktive Phasen abwechslungsreich eingeplant werden. Material zur Erstellung der

Kurse soll als Hilfsmittel zur Verfügung gestellt werden, allerdings soll auch das selbstständige Kreieren von Materialien erlaubt sein. Die Freizeit wird von den meisten lieber privat als in fester Gruppenplanung verbracht.

In dem Workshop wird ein Kurs entwickelt, den die Oberstufen-Schüler*innen im Anschluss an den Workshop mit Schüler*innen der Unterstufe an ihrer eigenen Schule in AG-Form durchführen können. Dieser Kurs soll das Interesse an MINT-Themen bei den Unterstufen-Schüler*innen wecken bzw. verstärken. Der Kurs soll dabei vorzugsweise an vier je 60- bis 90-minütigen Terminen in aufeinanderfolgenden Wochen stattfinden und im Stil des forschenden Lernens gestaltet sein.

Da der Workshop im Rahmen einer Bachelorarbeit erstellt wurde, sind noch nicht alle Inhalte endgültig ausgearbeitet. So müssen noch weitere Experimente ergänzt werden. Zusätzlich müssen eine Einführungspräsentation mit Begrüßung, einem Überblick über den inhaltlichen und zeitlichen Plan und einer inhaltlichen Einführung sowie die Inhalte von Baustein II unter Berücksichtigung der aktuellen MLeNa-Basisworkshops erstellt werden. Auch eine erste Durchführung des Workshops steht noch aus. Nach der ersten Durchführung des Workshops sollte eine Evaluation mit den Teilnehmer*innen und den Tutor*innen durchgeführt werden, um mögliche Schwachstellen ausbessern zu können.

Neben dem Thema Magie können perspektivisch weitere interessenfördernde Themen wie Gamification und Game-based Learning in den Workshop mit einbezogen werden.

8. Literatur

- Anger, C. Koppel, O. & Plünnecke, A. (2017). MINT-Frühjahrsreport 2017. MINT-Bildung: Wachstum für die Wirtschaft, Chancen für den Einzelnen. Gutachten für BDA, BDI, MINT Zukunft schaffen und Gesamtmetall. Institut der deutschen Wirtschaft Köln.
- Bünning, F. Dick, M. Jahn, R. W. & Seltrecht, A. (2020). Zwischen Ingenieurpädagogik, Lehrkräftebildung und betrieblicher Praxis. In: Berufsbildung, Arbeit und Innovation – Hauptreihe, Band 57.
- Ebner, R. Fecht, D. Plath, J. & Tekhaus, N. (2023). MINT Nachwuchsbarometer 2023. Durchgeführt von Prof. Dr. Olaf Köller, IPN, Kiel. https://www.nationalesmintforum.de/fileadmin/medienablage/user_upload/MINT_Nachwuchsbarometer2023_final_WEB_DS.pdf (zuletzt besucht am 04.05.2025)
- Galbraith, J. & Winterbottom, M. (2011). Peertutoring: What's in it for the tutor? In: Educational Studies, 37(3), 321–332. https://www.researchgate.net/publication/263479182_Peer-tutoring_What's_in_it_for_the_tutor (zuletzt besucht am 04.05.2025)
- Gagné, R. M. & Briggs, L. J. (1974). Principles of

- instructional design. ISBN: 0030081718.
MLeNa-Website. (o. D.). MLeNa – Das Programm. <https://www.milena.schule/programm> (zuletzt besucht am 04.05.2025)
- Oyrer, S. (2018). Forschendes Lernen als kreativer Erkenntnisweg im Physikunterricht der Sekundarstufe. In: Pädagogische Horizonte, 2(2), 15–35. <https://www.paedagogische-horizonte.at/index.php/ph/article/view/47> (zuletzt besucht am 04.05.2025)
- Schorn, B. & Heinke, H. (2018). Programm MLeNa zur MINT-Lehrer-Nachwuchsförderung: Weiterentwicklungen des Programms für größere Teilnehmendenzahlen. PhyDid B – Didaktik der Physik – Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung. <https://ojs.dpg-physik.de/index.php/phydid-b/article/view/902/1035> (zuletzt besucht am 04.05.2025)

MINT-Lehrkräfte von morgen

- Berufsorientierung und Praxiserfahrung im MILENa-Programm -

Christina Lüders¹, Tobias Winkens¹, Maria Hinkelmann¹, Christian Salinga¹, Carina Göbels¹,
Leonie Jung², Julia Tocco², Heike Theyßen², Bernadette Schorn³, Heidrun Heinke¹

¹ RWTH Aachen University

² Universität Duisburg-Essen

³ Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn
milena@physik.rwth-aachen.de

Kurzfassung

MILENa ist ein Programm zur MINT-Lehrkräfte-Nachwuchsförderung, welches seit 2013 existiert und dem sich dramatisch verschärfenden MINT-Lehrkräftemangel entgegenwirken soll. Interessierte Oberstufenschüler:innen werden in der Phase der Berufsentscheidung langfristig begleitet und erhalten tiefe praxisnahe Einblicke in das Berufsfeld einer MINT-Lehrkraft mit dem Ziel eine fundierte Studienentscheidung zu unterstützen. Seit 2017 wird das Programm in einer modifizierten Variante angeboten, zunächst von der RWTH Aachen und seit 2019 auf weitere Hochschulen ausgeweitet. Dabei werden die Programmbestandteile aktuell in einem Präsenz- oder Onlineformat umgesetzt. Zur Grundstruktur gehören neben einer Auftakt- und Abschlussveranstaltung ein mehrtägiger Basis-Workshop, welcher insbesondere Grundlagen zur Unterrichtsgestaltung, -planung, -vorbereitung und -durchführung vermittelt. In anschließenden schulischen Angeboten erproben sich die Schüler:innen in der Lehrendenrolle. Eine Beteiligung vieler Hochschulen ermöglicht neben wachsenden Teilnehmer:innenzahlen außerdem vielfältige (digitale) Zusatzangebote zu unterrichtlichen Themenstellungen.

1. Grundproblem

Die aktuelle Berichterstattung in den Medien verdeutlicht, dass bundesweit Tausende Lehrkräfte fehlen und sich der Lehrkräftemangel in den kommenden Jahren noch weiter verschärfen wird.

Prognosen der Bundesländer zeigen, dass sich der Lehrkräftemangel insbesondere im MINT-Bereich weiterführender Schulen konzentriert. Nach Schätzungen des Landes Nordrhein-Westfalen wird dort in den kommenden Jahren ein besonders hoher Bedarf an Lehrkräften in den Fächern Mathematik, Chemie, Physik, Informatik und Technik bestehen (Ministerium für Schule und Bildung des Landes Nordrhein-Westfalen, 2023).

Entsprechende Ergebnisse können auch den von Klaus Klemm durchgeführten Studien zur Bedarfsdeckung im Lehrkräftebereich in Nordrhein-Westfalen entnommen werden, die von der deutschen Telekomstiftung beauftragt wurden (Klemm, 2015 und Klemm, 2021). Zentrale Ergebnisse dieser Studien zur Bedarfsdeckung sind in Abbildung 1 dargestellt. Als Bedarfsdeckung wird hierbei das Verhältnis aus Neuangebot an ausgebildeten Lehrkräften und dem erwarteten Einstellungsbedarf in den jeweiligen Fächern (in %) bezeichnet. Die erste Studie stammt aus dem Jahr 2015 und stellte eine Prognose für das Jahr 2025/26 dar (hellblau in Abbildung 1). Im Jahr 2021 aktualisierte Klemm diese Prognose durch eine neue Berechnung für das Schuljahr 2030/31 (dunkelblau in Abbildung 1). Schon in der ersten Studie wurde ein großer Mangel an Lehrkräften im MINT-Bereich prognostiziert. Unter anderem durch äußere

Umstände, wie die Umstellung von einer achtjährigen zu einer neunjährigen gymnasialen Schullaufbahn in Nordrhein-Westfalen und die Einführung des Fachs Informatik als Pflichtfach, kommt es bei der Prognose für das Schuljahr 2030/31 zu einer weiteren drastischen Verschärfung des erwarteten

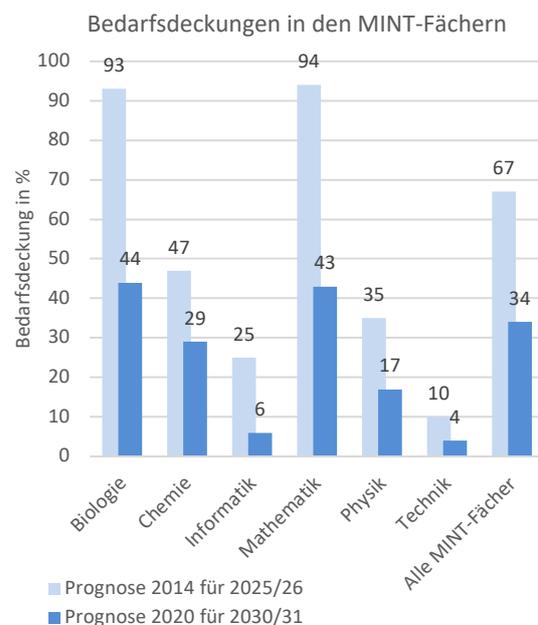


Abb. 1: Darstellung der Prognose zur prozentualen Deckung des Lehrkräftebedarfs für die MINT-Fächer in Nordrhein-Westfalen. Quelle: Eigene Darstellung nach Klemm (2021).

Lehrkräftemangels. In keinem der dargestellten Fächer kann demnach auch nur die Hälfte des Bedarfs gedeckt werden, die gesamte erwartete Bedarfsdeckung liegt bei nur 34%. Besonders dramatisch ist die Bedarfsdeckung in den Fächern Informatik und Technik.

Die Deutsche Physikalische Gesellschaft (2023) erklärt, dass Lehrkräfte als Multiplikatoren gelten und somit ein Mangel an gut ausgebildeten Lehrkräften zu einer mangelnden Bildung der nächsten Generation führt (Deutsche Physikalische Gesellschaft, 2023). Durch die stetige Digitalisierung unserer Gesellschaft ist vor allem eine Grundbildung im MINT-Bereich von hoher Bedeutung. Somit sind besonders diese Lehrkräfte wichtig.

Weiterhin stellt die Deutsche Physikalische Gesellschaft im Jahr 2023 in einer Studie den aktuellen Stand des Lehramtsstudiums im Fach Physik dar (Deutsche Physikalische Gesellschaft, 2023). Das Lehramtsstudium im MINT-Bereich nimmt an den deutschen Hochschulen eine besondere Rolle ein: Grundsätzlich gibt es ein flächendeckendes Angebot im Lehramt Physik. Die Anzahl der Absolvent:innen hält sich auf einem niedrigen, aber stabilen Niveau. Dabei finden die meisten Fachveranstaltungen gemeinsam mit Fachstudierenden statt.

Lehramtsstudierende im Fach Physik unterscheiden sich jedoch besonders aufgrund ihrer Studienwahlentscheidung von Fachstudierenden der Physik: 97 % der Studierenden haben einen klaren Berufswunsch als Lehrkraft und sehen das Studium daher als eine berufsspezifische Qualifikation an. Die Motivation der Studierenden ist oft der eigene Physikunterricht. Prädiktoren von Studienerfolg, wie z.B. die Note der Hochschulzulassung oder die letzte Physiknote, zeigen aber, dass die Lehramtsstudierenden durch signifikant schlechtere Abiturergebnisse eine geringere Studienerfolgswahrscheinlichkeit als Fachstudierende haben. Im Hinblick auf das dargestellte Problem des Lehrkräftemangels sollte es daher das Ziel sein, dass Schüler:innen sich für ein MINT-Lehramtsstudium entscheiden und dieses auch abschließen (Deutsche Physikalische Gesellschaft, 2023).

2. Leitideen und Wirkungsmechanismen

Durch das MILENa-Programm soll dem Problem des MINT-Lehrkräftemangels entgegengewirkt werden. Die Schüler:innen mit Interesse am MINT-Lehramt werden frühzeitig (in der Oberstufe) identifiziert und in der wichtigen Phase der Berufsentscheidung über einen längeren Zeitraum begleitet. Dabei werden neben Programmbestandteilen, die von den teilnehmenden Hochschulen angeboten werden, auch vorhandene schulische Angebote zur Erprobung der Rolle als MINT-Lehrkraft genutzt. Insgesamt erhalten die Schüler:innen so tiefe Einblicke in das Berufsfeld der MINT-Lehrkraft und können auf Grundlage ihrer Kenntnisse und Erfahrungen eine fundierte



Abb. 2: Wirkungsmechanismen des MILENa-Programms. Quelle: Eigene Darstellung.

Studienentscheidung für oder gegen ein MINT-Lehramtsstudium treffen.

Die Wirkungsmechanismen des MILENa-Programms zur Minderung des sich verschärfenden MINT-Lehrkräftemangels sind in Abbildung 2 aufgezeigt: Einerseits wird durch das MILENa-Programm ein praxisnaher Einblick in den MINT-Lehrkräfteberuf erlangt und aufgrund der damit verbundenen Sichtbarkeit, der wahrgenommenen Attraktivität, der Beratung, der gewonnenen Erfahrungen und Identifikation können mehr Schüler:innen das Studium beginnen. Andererseits haben diese Studierenden durch ihre Vorerfahrungen eine bewusste Studienentscheidung getroffen und Einblicke in die Lehramtsausbildung in Hochschulen erhalten, wodurch Abbruchtendenzen im Studium entgegengewirkt werden kann (Schild 2021). Die Teilnehmer:innen können auch nach dem MILENa-Programm in Alumni-Angeboten weiter unterstützt werden.

3. MILENa auf dem Weg

Seit Beginn hat sich das MILENa-Programm insbesondere hinsichtlich seiner Größe und Reichweite, aber auch in formalen Aspekten seiner Gestaltung weiterentwickelt (Abbildung 3). In der ersten Phase wurde das Programm vom Verein MINT-EC in Kooperation mit der RWTH Aachen und weiteren lehrerausbildenden Hochschulen in NRW (Universität Duisburg-Essen, Bergische Universität Wuppertal und Universität zu Köln), Hessen (Goethe-Universität Frankfurt) und Bayern (Universität Regensburg) mit finanzieller Unterstützung der Wilhelm und Else Heraeus-Stiftung durchgeführt. In vier Jahrgängen hatten ab Herbst 2013 insgesamt 250 Schüler:innen von 10 MINT-EC Mitgliedschulen aus vier Bundesländern (NRW, Rheinland-Pfalz, Hessen und Bayern) über jeweils zwei Jahre ab der Jahrgangsstufe 10 die Gelegenheit einen praxisorientierten Einblick in den MINT-Lehrkräfteberuf zu erhalten (Schorn, 2018). Mit dem Ziel, mehr Schüler:innen die Gelegenheit einer Teilnahme zu bieten, wurden im Rahmen der Weiterentwicklung des Programms inhaltlich-organisatorische Modifikationen vorgenommen. So wurde die Durchführung der Hochschulveranstaltungen verändert, indem statt sechs eintägiger Veranstaltungen an Schultagen neben zwei eintägigen Veranstaltungen ein mehrtägiges Workshopangebot am Wochenende oder in den Ferien eingeführt wurde. Zusätzlich

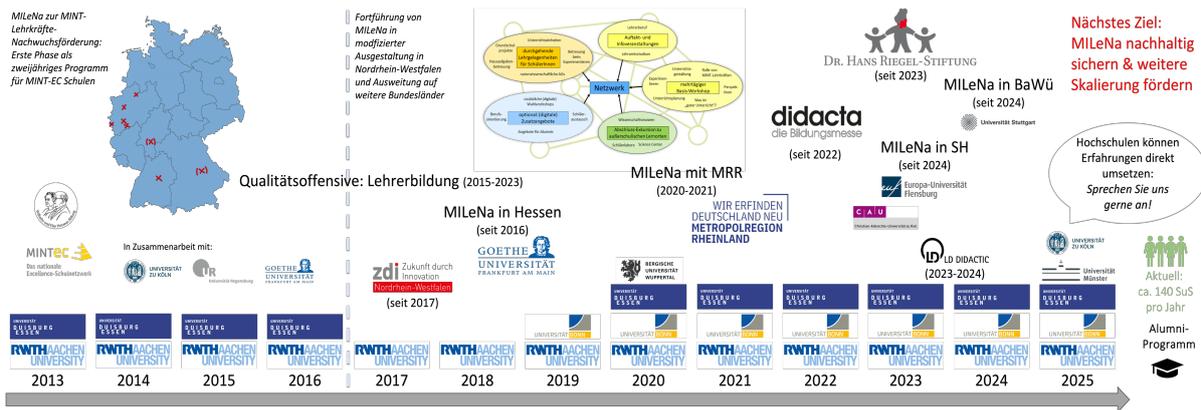


Abb. 3: Entwicklung des MILENa Programms seit 2013 mit beteiligten Institutionen. Quelle: Eigene Darstellung.

wurde die Zeitdauer des Programms für die Schüler:innen flexibilisiert, indem den Schulen die Wahl zwischen einer ein- oder zweijährigen Laufzeit überlassen wird. Diese Änderungen wurden begleitet von einer Öffnung des Programms für alle weiterführenden Schulen mit gymnasialer Oberstufe über das Excellence-Schulnetzwerk MINT-EC hinaus.

Seit dem Start des modifizierten MILENa-Programms im Herbst 2017 ist die Anzahl der durchführenden lehrerausbildenden Hochschulen in NRW gestiegen, was insgesamt zu einer Zunahme der teilnehmenden Schüler:innen geführt hat. Darüber hinaus wurde das Angebot auch in anderen Bundesländern weitergeführt (Hessen) oder unter Nutzung der Erfahrungen aus NRW initiiert (Schleswig-Holstein und Baden-Württemberg).

Die personellen Ressourcen für die Weiterentwicklung und Koordination des als Pilotprojekt im Herbst 2017 an der RWTH Aachen gestarteten modifizierten Nachwuchsförderungsprogramms wurden im Rahmen der gemeinsamen „Qualitätsoffensive Lehrerbildung“ von Bund und Ländern aus Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert (Lüders, 2020). Die operativen Kosten des Programms konnten in dieser Zeit vor allem durch die finanzielle Unterstützung der Programmpartner zdi und zwischenzeitlich die Metropolregion Rheinland gedeckt werden. Seit 2023 erfährt das überregionale Netzwerk durch die Kooperation mit der Dr. Hans Riegel-Stiftung eine personelle und finanzielle Unterstützung, die maßgeblich zu der sich derzeit bundesweit entwickelnden Ausweitung des MILENa-Programms beiträgt.

4. Status Quo

Im Schuljahr 2024/2025 wird das MILENa-Programm in Nordrhein-Westfalen von den Hochschulen in Aachen, Bonn und Duisburg-Essen angeboten. Die gemeinsame Auftaktveranstaltung fand im September 2024 mit circa 140 Schüler:innen sowie 40 Lehrkräften statt. Die inhaltliche Ausgestaltung des MILENa-Programms liegt in der Verantwortung der Hochschulen. Die Basis-Workshops werden dabei von den verschiedenen Hochschulen eigenständig verantwortet, wobei sich die Hochschulen bei der

Gestaltung der Workshops an einem gemeinsamen Kerncurriculum orientieren. Die organisatorischen Formate unterscheiden sich aber und umfassen einen mehrtägigen Übernachtungs-Workshop (Aachen), einen mehrtägigen Workshop ohne gemeinsame Übernachtung (Bonn) oder mehrere Workshopstage über einen längeren Zeitraum verteilt (Essen).

4.1. Bausteine des MILENa Programms

Die aktuelle Ausgestaltung des MILENa-Programms kann Abbildung 4 entnommen werden. Das Programm kann durch die teilnehmenden Schüler flexibel und auf die Möglichkeiten in der Schule ausgerichtet in ein- oder zweijähriger Programmlaufzeit angeboten werden. Die einzelnen Programmbestandteile werden im Folgenden erläutert:

Zu Beginn und am Ende des MILENa-Programms finden hochschulübergreifende Auftakt- und Abschlussveranstaltungen statt (in dunkelblauer Farbe dargestellt). Die Auftaktveranstaltung findet zeitnah nach den Sommerferien zu Beginn des neuen MILENa-Jahrgangs statt. Dabei lernen sich die Schüler:innen kennen, bearbeiten in Form von World-Cafés aktuelle Fragestellungen zum MILENa-Programm oder zum Lehrkräfteberuf und bestreiten eine Team-Challenge in schulübergreifenden Teams, um die Vernetzung unter den Teilnehmer:innen zu fördern. Die Lehrkräfte nehmen währenddessen an einen Lehrkräfteauftakt teil, indem sie sich über mögliche Umsetzungsformen und Best-Practice-Beispiele der eigenen Schulen austauschen können. Während der Abschlussveranstaltung am Ende des Schuljahres haben sowohl die Schüler:innen als auch die Lehrkräfte die Möglichkeit, sich über die eigenen Erfahrungen im MILENa-Jahr auszutauschen. Außerdem lernen die Schüler:innen außerschulische Lernorte und Möglichkeiten ihrer Integration in den eigenen Unterricht kennen. In der Abschlussveranstaltung erhalten die Schüler:innen auch ein Zertifikat über die Teilnahme am MILENa-Programm.

Nach der Auftaktveranstaltung zu Beginn des Schuljahres folgt im Herbst ein mehrtägiger Basis-Workshop (in Abbildung 4 in roter Farbe dargestellt). Inhaltlich beschäftigen sich die Schüler:innen während

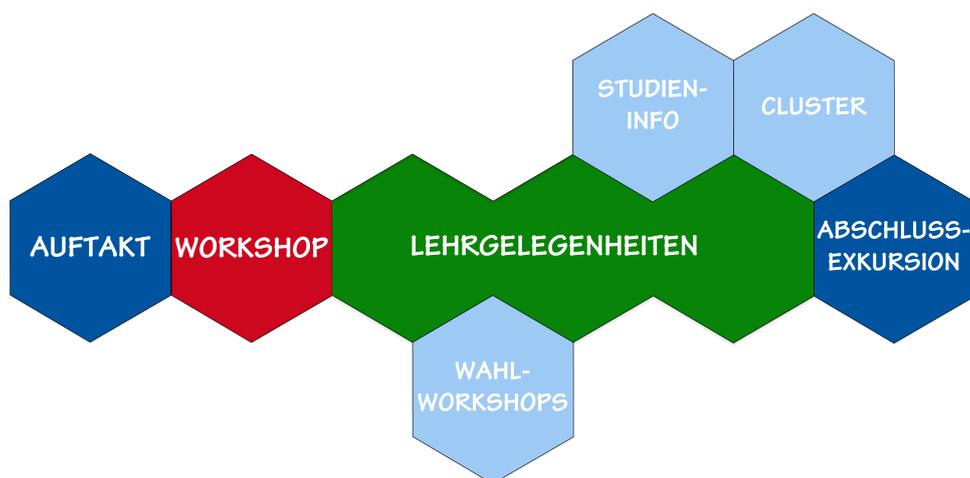


Abb. 4: Programmbestandteile des MILENa-Programms. Quelle: Eigene Darstellung.

des Basis-Workshops mit Grundlagen zur Unterrichtsplanung, -gestaltung, -vorbereitung und -durchführung. Als Expert:innen für Unterricht erarbeiten die Schüler:innen Merkmale guten Unterrichts. Zentral ist auch die Frage nach der Schule der Zukunft – die Schüler:innen sollen über notwendige Kompetenzen in der Welt von morgen nachdenken. Den Kern der schulischen Veranstaltungen bilden die Lehrgelegenheiten, die als wichtiger Bestandteil in das MILENa-Programm der Schulen integriert sind (in Abbildung 4 in grüner Farbe dargestellt). Die Schulen gestalten das MILENa-Programm unter Beachtung weniger, weicher Rahmenbedingungen selbstständig aus. Mögliche Formate sind zum Beispiel eine AG oder ein Projektkurs. Dieser wird in Nordrhein-Westfalen als Wahlmöglichkeit in zwei Halbjahren der Qualifikationsphase angeboten. Eine Rahmenbedingung für die Teilnahme der Schulen am MILENa-Programm ist, dass die Schüler:innen in dieser Phase die Möglichkeit haben, Lehrgelegenheiten durchzuführen. Diese können im Fachunterricht verankert sein, indem Schüler:innen systematisch hospitieren und eigene Unterrichtsphasen übernehmen, oder die Lehrgelegenheiten können im außerunterrichtlichen Bereich verortet sein. Viele Schulen führen beispielsweise MINT-AGs durch oder binden die MILENa-Schüler:innen in Grundschulangebote im MINT-Bereich ein. Auch die Mithilfe bei Angeboten am Tag der offenen Tür oder weiteren Schulveranstaltungen ist denkbar. Die Lehrgelegenheiten sind entscheidend für eine fundierte Studienentscheidung.

Optional werden im MILENa-Programm weitere Veranstaltungen angeboten (in Abbildung 4 in hellblauer Farbe dargestellt): So können die Schüler:innen auf freiwilliger Basis während des MILENa-Jahres an einer Studieninformation und weiteren optionalen Wahlworkshops teilnehmen. Die Studieninformation wird als hochschulübergreifende Online-Veranstaltung durchgeführt, sodass alle Schüler:innen die Hochschulen mit den unterschiedlichen Möglichkeiten an Lehramtsstudiengängen kennenlernen. Mögliche Themen für Wahlworkshops sind z.B. das Experimentieren mit dem Smartphone oder die Erstellung

von Lernvideos. Die Wahlworkshops werden auch für weitere Schüler:innen der MILENa-Schulen geöffnet, da einerseits übergreifende Kompetenzen und Softskills vermittelt werden und andererseits damit auch am Lehramt interessierte Schüler:innen erreicht werden können, die an dem gesamten, relativ zeitaufwändigen MILENa-Programm nicht teilnehmen können oder möchten.

Das außerdem in Abbildung 4 in hellblauer Farbe dargestellte Cluster ist ein Netzwerk für die Lehrkräfte, in dem ein intensiverer schulübergreifender Austausch von Erfahrungen, Konzepten und Materialien stattfindet. Außerdem beteiligen sich die Lehrkräfte im MILENa-Cluster aktiv an der Weiterentwicklung des MILENa-Programms.

4.2. Aktuelle Teilnehmendenzahlen

In Abbildung 5 sind die Teilnehmendenzahlen seit der Modifizierung des MILENa-Programms in NRW dargestellt. Während im Schuljahr 2017/18 eine eher kleine Gruppe von 47 Schüler:innen in das MILENa-Programm startete, konnten im Schuljahr 2024/25 140 Teilnehmer:innen an drei Hochschulen registriert werden. Im Jahr 2020/21 und im Jahr 2023/24 sind kleinere Einbrüche der Teilnehmer:innenzahlen zu beobachten. Für das Schuljahr 2020/21 ist dies mit der Covid-19-Pandemie zu begründen. Zu der Zeit lag der Fokus bei den beteiligten Schulen und Lehrkräften auf der Sicherung des Präsenzunterrichts und nicht auf weiteren schulischen Aktivitäten. Umso bemerkenswerter ist die erreichte Teilnehmer:innenzahl in diesem Jahrgang. Seit dem Schuljahr 2023/24 fehlt in der Oberstufe in Nordrhein-Westfalen aufgrund der Umstellung von einer achtjährigen zu einer neunjährigen gymnasialen Schullaufbahn an vielen Schulen ein Jahrgang der Oberstufe und somit ein Jahrgang mit potenziellen Teilnehmenden am MILENa-Programm. Auch diese Phase ist aber jetzt überwunden.

In der Abbildung 5 ist zusätzlich die Zahl der jeweils beteiligten Universitäten dargestellt. Da sich diese Zahl ab dem Schuljahr 2025/26 um zwei erhöhen

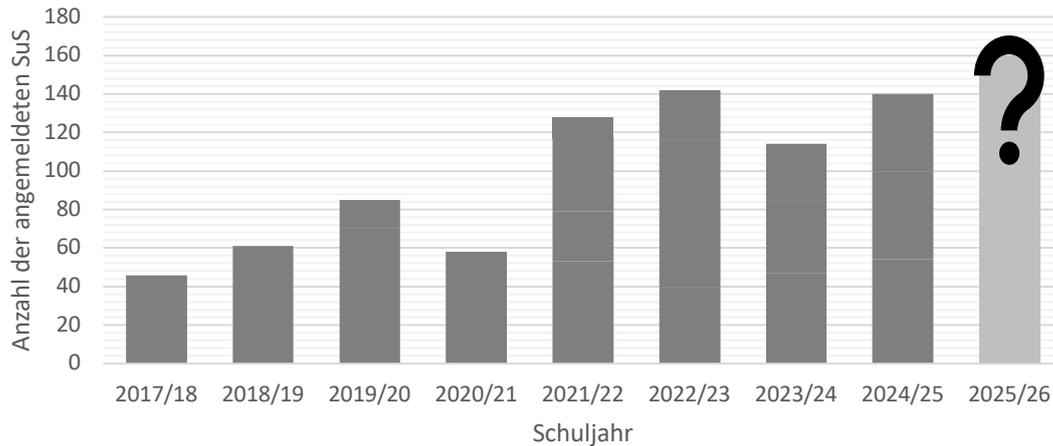


Abb. 5: Anzahl der angemeldeten Schüler:innen für das MILENa Programm seit 2017. Quelle: Eigene Darstellung.

wird, kann erwartet werden, dass die Zahl der Teilnehmer:innen weiter ansteigen wird, wenn zusätzlich zu den drei etablierten Standorten in Aachen, Duisburg-Essen und Bonn auch die Universitäten in Münster und Köln gemeinsam mit umliegenden Schulen das MILENa-Programm anbieten werden.

5. Zusammenfassung

Das MILENa-Programm bietet Schüler:innen eine Möglichkeit, in der Phase der Berufsorientierung einen vertieften Einblick in den Beruf einer MINT-Lehrkraft zu erlangen. In unterschiedlichen Programmversionen konnten seit 2013 vielfältige Erfahrungen sowohl bezüglich der inhaltlichen Gestaltung als auch der Organisation gesammelt werden. Aktuell werden die Programmbestandteile teilweise hochschulübergreifend, teilweise standortspezifisch und darüber hinaus von den teilnehmenden Schulen angeboten.

6. Interesse an Mitarbeit

Damit möglichst viele Schüler:innen die Möglichkeit haben, Erfahrungen im MILENa-Programm zu sammeln und eine fundierte Berufsentscheidung zum MINT-Lehrkräfteberuf treffen zu können, sollte eine flächendeckend wirkende Umsetzung des MILENa-Programms angestrebt werden. Die Erfahrungen des Programms geben wir daher gerne an Schulen und Hochschulen weiter, um einen niederschweligen Einstieg zu ermöglichen. Wir freuen uns auf eine Zusammenarbeit.

Wir bedanken uns bei allen, die das MILENa-Programm in seiner Entwicklung gefördert und unterstützt haben und dies gegenwärtig tun, insbesondere bei dem Verein MINT-EC.eV und der Wilhelm und Else Heraeus-Stiftung, dem BMBF, den beteiligten Universitäten, dem zdi NRW, der Metropolregion Rheinland und der Dr. Hans Riegel-Stiftung mit ihren engagierten Mitarbeiter:innen. Ein besonderer Dank gilt auch allen ehemaligen Mitarbeiter:innen im MILENa-Projekt, die das Programm mitgestaltet und geprägt haben.

7. Literatur

- Deutsche Physikalische Gesellschaft, Woitzik, A., Mecke, K., & Düchs, G. (2023). *Das Lehramtsstudium Physik in Deutschland*. Studierhebung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft e. V. Bad Honnef: DPG. ISBN 978-3-9818197-7-9.
- Klemm, K. (2015). *Lehrerinnen und Lehrer der MINT-Fächer: Zur Bedarfs- und Angebotsentwicklung in den allgemeinbildenden Schulen der Sekundarstufen I und II am Beispiel Nordrhein-Westfalens*. Gutachten im Auftrag der Deutsche Telekom Stiftung.
- Klemm, K. (2021). *Lehrkräftemangel in den MINT-Fächern: Kein Ende in Sicht – Zur Bedarfs- und Angebotsentwicklung in den allgemeinbildenden Schulen der Sekundarstufen I und II am Beispiel Nordrhein-Westfalens*.
- Lüders, C., Schorn, B., Salinga, C., Blum, U., & Heinke, H. (2020). *MINT-Lehrer-Nachwuchsförderung: Status quo und Ausblick*. *Naturwissenschaftliche Kompetenzen in der Gesellschaft von morgen: Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik Jahrestagung in Wien 2019*, 784–787.
- Ministerium für Schule und Bildung des Landes Nordrhein-Westfalen (MSB NRW). (2023). *Prognose zum Lehrkräftearbeitsmarkt in Nordrhein-Westfalen: Einstellungschancen für Lehrkräfte bis zum Schuljahr 2044/45*.
- Schild, N. (2021). *Eignung von domänenspezifischen Studieneingangsvariablen als Prädiktoren für Studienerfolg im Fach und Lehramt Physik* (Dissertation). Freie Universität Berlin.
- Schorn, B., & Heinke, H. (2018). *Programm MILENa zur MINT-Lehrer-Nachwuchsförderung: Weiterentwicklungen des Programms für größere Teilnehmendenzahlen*. *PhyDid B, Didaktik der Physik, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*, 477–482.

Transformative BNE im Kontext Wasser

- Projekt Aqua Citizens -

Kai Bliesmer*, Michael Komorek* , Tjorben Meyer*

*Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Institut für Physik, Carl-von-Ossietzky-Str. 9-11, 26129 Oldenburg
michael.komorek@uni-oldenburg.de

Kurzfassung

Vorgestellt wird das von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) geförderte Projekt „Aqua-Citizens“, das im DBU-Projektcluster zur transformativen Bildung für nachhaltige Entwicklung (tBNE) verortet ist. Im Projekt „AquaCitizens“ wurde als Kontext für die Realisierung transformativer Bildungsprozesse die nachhaltige Wasserversorgung gewählt: Angesichts des Klimawandels zählen die Sicherung der Wasserversorgung sowie ein zukunftsfähiges technisches Wassermanagement zu den zentralen Aufgaben unserer Zeit. Sie betreffen nicht nur das individuelle Verhalten, sondern fordern auch Kommunen und Gesellschaft als Ganzes heraus, bestehende Infrastrukturen neu zu denken. Vor diesem Hintergrund wurde dieses bedeutsame Transformationsfeld bewusst als Ausgangspunkt für das Projekt gewählt. „AquaCitizens“ zielt auf Veränderungen im Denken und Handeln, auf ein integratives Verständnis von Nachhaltigkeit, auf die Hinterfragung bestehender Strukturen, auf die Integration von praktischen Erfahrungen und auf die Kooperation mit außerschulischen Partnern. Der Beitrag stellt die Struktur des Projekts vor und präsentiert Ergebnisse einer ersten explorativen Studie zu den Alltagsvorstellungen von Laien über die Herausforderungen eines nachhaltigen Wassermanagements. Die Ergebnisse der Studie dienen dazu, Angebote in „AquaCitizens“ entlang einer Didaktischen Rekonstruktion systematisch-fachdidaktisch zu entwickeln.

1. Fachdidaktische Operationalisierung der tBNE

Für die fachdidaktische Ausgestaltung von „AquaCitizens“ war es zunächst nötig, die primär bildungswissenschaftlich fundierten Konzeptualisierungen einer Bildung für nachhaltige Entwicklung samt ihrer unterschiedlichen Ausrichtungen (inkl. der transformativen BNE) auf (fach)didaktische Forschungs- und Entwicklungskonzepte zu beziehen. Aus dieser Verknüpfung wurden fünf zentrale Leitlinien abgeleitet, die eine (fach)didaktische Operationalisierung einer tBNE in „AquaCitizens“ bilden und als Grundlage für die didaktische Strukturierung diesbezüglicher Bildungsangebote fungieren. Daher werden im Folgenden zunächst Konzeptualisierungen einer Bildung für nachhaltige Entwicklung kurz beschrieben, um darauf basierend die besagten Leitlinien vorzustellen.

1.1. Konzeptualisierungen von (t)BNE

Vare und Scott (2007) haben den gängigen Unterschied zwischen zwei Modi einer Bildung für nachhaltige Entwicklung geprägt: BNE 1 und BNE 2. Ersteres wird als instrumentelle Bildung für nachhaltige Entwicklung bezeichnet und hat eine stark erzieherische Komponente. BNE 1 ist auf Wissensvermittlung und Verhaltenssteuerung gerichtet: Lernende sollen durch Bildungsangebote dazu bewegt werden, sich in ihrem Alltag nachhaltiger zu verhalten; Bildung ist hier also Mittel zum Zweck. BNE 2 wird im Gegensatz dazu emanzipatorische Bildung für nachhaltige Entwicklung genannt. Hier steht die Befähigung der Lernenden im Vordergrund, eine selbstbestimmte

Urteils- und Handlungsfähigkeit in Kontexten der Nachhaltigkeit zu entwickeln, denen eine hohe Komplexität inhärent ist. Lernende sollen hier durch Bildungsprozesse ermächtigt werden, mündig zu bewerten und zu handeln. Eine weitere, dritte Variante stellt die transformative BNE dar. Diese wird von Vare (2014) als BNE 3 bezeichnet und als „expansive learning“ (Vare, 2014, S. 7) gedeutet. Schild, Leng und Hammer (2019) verstehen sie hingegen als Subform von BNE 2. Die transformative BNE geht über die anderen beiden Modi insofern hinaus, als es ihr Ziel ist, tiefgreifende Veränderungen im Denken der Lernenden anzustoßen – mit dem Anspruch, daraus konkretes Handeln und aktives Engagement für nachhaltige Entwicklung hervorzubringen. Darüber hinaus sollen Lernende befähigt werden, in ihrem sozialen Umfeld als Multiplikator:innen für nachhaltiges Denken und Handeln zu wirken.

1.2. Fachdidaktische Leitlinien für tBNE

Gemäß den Darlegungen zum Unterschied zwischen tBNE und anderen Modi der BNE ist es wichtig, kein träges Wissen und kein abstraktes Können im Transformationsfeld Wasser zu vermitteln. Denn obwohl Wissen und Können wichtige Voraussetzungen für nachhaltiges Handeln sind, sollen der Aufbau von Kompetenz, also der Wille, Wissen und Fähigkeiten einzusetzen, sowie die Performanz der Zielgruppe (ihre tatsächliche Einflussnahme im Transformationsfeld) im Fokus stehen (WBGU 2011; Balsiger et al., 2017). Um dies zu erreichen, sind Leitlinien ent-

wickelt worden, die den Ansprüchen einer tBNE Rechnung tragen sollen und als Basis für die fachdidaktische Ausgestaltung von „AquaCitizens“ fungieren. Diese Leitlinien haben notwendigerweise einen Bezug zur Selbstbestimmungstheorie der Motivation (Deci & Ryan, 2012; erweitert durch Lewalter & Greyer, 2009), weil Lernende zur Teilnahme am Vorhaben und zum transformativen Handeln motiviert werden müssen und weil gemäß Balsiger et al. (2017, S. 358) transformative Bildung tiefgreifende Veränderung in der persönlichen Haltung umfasst: „Transformative learning for ESD involves a deep structural shift in the basic premises of thought, feelings and actions. It is a shift of consciousness that dramatically and permanently alters our way of being in the world“. Folgende fünf Leitlinien wurden formuliert.

1.2.1. Regionale Herausforderungen fokussieren

Um in der Gesellschaft transformative Kräfte für eine nachhaltige Entwicklung freizusetzen, ist nachhaltige Entwicklung nicht als abstrakte Idee zu intonieren, sondern es ist für die unmittelbare Relevanz regionaler Herausforderungen der nachhaltigen Entwicklung für das persönliche Leben der Lernenden und für ihre Region zu sensibilisieren. Bei „AquaCitizens“ müssen daher Problemkontexte im Bereich Wasser in der Region Nordwest-Niedersachsen unter dem Blickwinkel der Sustainable Development Goals analysiert und als bedeutsame Lerngegenstände herausgearbeitet werden. (→ Motivationsfacette: Relevanzwahrnehmung).

1.2.2. Vom Wissen zum Handeln gelangen

Damit Lernende vom Wissen zum Handeln gelangen können, ist es konstitutiv, Handlungskontexte so aufzuschließen, dass sie ihr Wissen und ihre Fähigkeiten einsetzen können, um nachhaltige Entwicklung mitgestalten und einen realen Impact erzielen zu können. Transformative Bildung ist bestrebt, die Selbstwirksamkeit der Lernenden zu stärken, sodass sie sich selbst als kompetent in der Gestaltung einer nachhaltigen Entwicklung wahrnehmen. In „AquaCitizens“ wird daher der Handlungsansatz des Citizen Science verfolgt, bei dem die Kommunikation der Erkenntnisse und Ergebnisse der Lernenden an eine interessierte Öffentlichkeit und an politische Entscheidungsträger (Stakeholder) im Fokus steht. Citizen Science bietet einen Zugang zum transformativen Handeln, das letztlich erreicht werden soll. (→ Motivationsfacetten: Kompetenzwahrnehmung, Selbstwirksamkeitserwartung/-erfahrung).

1.2.3. Individualisiert und partizipativ lernen

Wie das Interessenmodell RIASEC (Höft, 2020) darstellt, haben Menschen unterschiedliche Präferenzen, wenn es um ihren Zugang zu Lerngegenständen geht: Manche sind sehr praktisch orientiert, andere haben Freude daran, abstrakt zu denken. Sie unterscheiden sich auch dahingehend, ob sie eher mit anderen im Team oder lieber allein arbeiten wollen. Eine tBNE muss diese Präferenzen berücksichtigen; die lernende

Person soll mitentscheiden und auswählen dürfen, wie sich ihr individueller Bildungsprozess gestaltet. Bei „AquaCitizens“ muss es daher modulare Aktivitäten geben, die Lernenden auswählen und selbst miteinander kombinieren können; Lernende werden mit Blick auf ihre Interessen beraten. Die gewählten Module werden mit den Lernenden partizipativ ausgestaltet (vgl. WBGU, 2011, S. 378), sodass sie mitbestimmen, welches Lernangebot sie wählen möchten. (→ Motivationsfacette: Autonomie).

1.2.4. Kooperative und längerfristige Angebote

Eine tBNE bietet im Idealfall Bildungs- und Aktivitätsformate an, die soziale Eingebundenheit im vom Lernenden selbst bestimmten Maße unterstützen. Eine Integration von Schülerlaborangeboten in den Citizen-Science-Ansatz erscheint daher besonders geeignet. Der Citizen Science-Ansatz impliziert eine längerfristige Zusammenarbeit entlang von Datenerhebung, -interpretation und -kommunikation. Parallel hierzu bieten Schülerlabor-Angebote zum Problemkontext Wasser vertiefte experimentelle Primärerfahrungen, die das Wissen und die Fähigkeiten der Lernenden erweitern, autonome Handlungen zulassen und auf die Bewältigung des Citizen-Science-Aufgaben vorbereiten. (→ Motivationsfacetten: Soziale Eingebundenheit).

1.2.5. Neue Zielgruppen erreichen

Eine tBNE muss Menschen unabhängig von ihrer sozialen Herkunft, ihrer Schulform und der elterlichen Unterstützung erreichen. Nur dann lässt sich ein breiteres gesellschaftliches Potenzial für eine nachhaltige Entwicklung aufschließen und gleichzeitig ein Beitrag zur Bildungsgerechtigkeit leisten. Daher wird das Bildungs- und Aktivitätsprogramm von „AquaCitizens“ weitgehend in mobiler Form durchgeführt. Dies senkt die Hürden für die Teilnahme erfahrungsgemäß deutlich (Komorek & Schmitz, 2023). Mit mobil ist zweierlei gemeint: Zum einen werden Bildungsangebote zu den Kindern und Jugendlichen gebracht (mobile Angebote). Zielorte für die mobilen Angebote sind mit Blick auf unterrepräsentierte Zielgruppen ländliche Regionen, nicht-gymnasiale Schulformen und Jugend- und Freizeitzentren etc. Zum andern werden die Kinder und Jugendlichen an ihren Wohnorten per Sammeltaxi abgeholt, um an der Universität oder bei den außerschulischen Partnern an individuellen Projekten zu arbeiten (mobile Lernende). (→ Motivationsfacetten: soziale Eingebundenheit; ergänzt um Aspekte von Gerechtigkeit und Ausschöpfung ungenutzter individueller und gesellschaftlicher Potenziale).

2. Projektstruktur von „AquaCitizens“

Aus den Leitlinien wurde eine Projektstruktur mit fünf zentralen Aktivitäten abgeleitet. Hierbei wurden zwei außerschulische Kooperationspartner gewählt, die bei der Umsetzung des Projekts unterstützen. Das ist zum einen der Oldenburgisch-Ostfriesische Was-

serverband (OOWV) und zum anderen das Regionale Umweltbildungszentrum Oldenburg (RUZ).

Folgende fünf Aktivitäten werden im Sinne der Leitlinien im Projekt umgesetzt.

2.1. Aktivität I: Mobilität der Angebote

Um „AquaCitizens“ bei jungen Menschen bekannt zu machen, werden mobile Experimentier-Angebote eingesetzt. Die existierenden Netzwerke mit Jugendzentren der Region und mit Schulen, u. a. in Oldenburg, werden aktiviert und dienen der Bewerbung von Nachmittagsangeboten in Jugendzentren und Schulen. Mit den mobilen Experimentierangeboten werden bestimmte Benachteiligungen des Zugangs zu MINT-Angeboten ausgeglichen. Denn die Angebote kommen an die Orte der Kinder und Jugendlichen, vor allem in ihren Freizeitbereich. Inhaltlich geht es um einfache Experimente zum Thema Wasser, die wenig Vorwissen verlangen, bspw. Experimente zu den Themen Auftrieb und Tauchen, Deichbau, Strömungsexperimente, Wasserkreislauf. Hands-on-Experimente und erprobte Modelle sollen an die physikalisch-technischen Eigenschaften von Wasser herantühren. Der Zugang ist zunächst spielerisch, thematisiert aber auch die Kontexte, die einen Nachhaltigkeitsbezug haben wie sauberes Wasser, Niederschläge, Küstenschutz. Im Rahmen dieser Aktivitäten werden diejenigen Kinder und Jugendlichen angesprochen, die ein verstärktes Interesse zeigen, sich mit dem Thema Wasser zu befassen. Ihnen wird angeboten, zu längerfristigen Aktivitäten zu den Einrichtungen der Projektpartner zu kommen.

2.2. Aktivität II: Mobilität der Lernenden

Die Interessierten werden zu wasserbezogenen Angeboten zum OOWV, ins RUZ und ins Schülerlabor der Uni eingeladen. Hier werden Projekte von zwei bis drei Nachmittagen angeboten, zu denen die Kinder und Jugendlichen von ihren Wohnorten abgeholt werden (Sammeltaxi). Die projektartigen Angebote zielen darauf, die Selbstwirksamkeit der Kinder und Jugendlichen zu fördern, indem sie mit vorhandenen Funktionsmodellen arbeiten (z. B. zum globalen Wasserkreis, zur Strukturbildung an der Küste) und eigenen kleinen Forschungs- und Messaufgaben nachgehen. Bei diesen Aktivitäten werden sie für die Problematik im Kontext von nachhaltiger bzw. nicht-nachhaltiger Wassernutzung und Effekte klimabedingter Starkwetterereignisse sensibilisiert. In eingebetteten Workshops erfahren sie, wie Datenerhebungen eine Rolle spielen und wie Ergebnisse kommuniziert werden. Bei dieser Aktivität geht es erneut darum, Kinder und Jugendliche zu finden, die das weitergehende Interesse haben, der regionalen Bedeutung von Wasser und der Nutzung von Wasser im Citizen-Science-Modus auf die Spur zu kommen

2.3. Aktivität III: Citizen-Science

Im Sinne transformativer Bildung für nachhaltige Entwicklung ist diese Aktivität der Kern von Aqua-

Citizens. Messungen und Beobachtungen, die Dokumentation von wasserbezogenen Phänomenen sowie die Befragungen von Laien (Bevölkerung) und Expert:innen werden von den Kindern und Jugendlichen an ihren Wohn- und Schulorten oder weiteren Orten durchgeführt und aufeinander bezogen. Die Messung und Beobachtung der Niederschläge, der Wassernutzung und des Wasserverbrauchs, die Beobachtung und Dokumentation von Wetterereignissen sowie die Beobachtungen und Befragung von Bürger:innen zum Umgang mit Wasser und von Wassereexpert:innen hinsichtlich Wasserbaumaßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel stehen im Fokus. Im Begleitprogramm eignen sich die Teilnehmenden Methoden der Datenerhebung und Datendokumentation an und erfahren teils spielerisch, wie man Laien und Expert:innen befragt.

2.4. Aktivität IV: Kommunikation und Transfer

Aus den Messergebnissen, den Befragungen und dem Austausch heraus werden Leitlinien für den Umgang mit Wasser in den Facetten Wassermangel, Entwässerung, Starkwetterereignisse u. a. entwickelt. Die Leitlinien werden bei Bürgeraktionen (Stadteiltreffs), mit der lokalen (Kommune) und regionalen (Kreis, Land) Politik diskutiert. Die Citizen-Science-Gruppen veranstalten Bürgerforen und stellen ihre Vorschläge in Gemeinde- und Stadträten vor, wobei sie ggf. auch Expert:innen einladen. Wege der Darstellung können auch kurze Filme sein, die die Gruppen drehen, um ihre Leitlinien, Vorschläge und Forderungen zu verdeutlichen. Die Filme und Leitlinien gehen auch auf die Ergebnisse der Citizen-Science-Forschung ein und betonen den transformativen und partizipativen Charakter der Handlungsempfehlungen. Die „AquaCitizens“-Projektpartner unterstützen die Kinder und Jugendlichen bei diesen Kommunikationsprozessen und nutzen dabei vorhandene Netzwerke mit Kommunen, Unternehmen, regionalen Stakeholdern, Politik und Expert:innen.

2.5. Aktivität V: Fortbildung und Vernetzung

Um bereits innerhalb der Projektlaufzeit die Verstärkung des Projekts anzulegen, werden die beteiligten Personen der Jugendeinrichtungen und auch Lehrkräfte zu Vernetzungsworkshops und zu Fortbildung hinsichtlich Citizen-Science-Aktivitäten fortgebildet. Bei der Vernetzung sollen die Akteure befähigt werden, den Kontakt zu den jetzigen Projektpartnern aufrechtzuerhalten und die Aktivitäten I und II selbst abzurufen. In den Fortbildungsanteilen der Workshops geht es um die Initiierung eines Citizen-Science-Prozesses und darum, wie Ergebnisse des Citizen-Science in einer Laien-Öffentlichkeit und in der regionalen Politik Gehör finden können.

3. Didaktische Rekonstruktion der Bildungsangebote im Projekt „AquaCitizens“

Die dargelegte Projektstruktur gilt es fachdidaktisch auszugestalten, d. h. die inhärenten Schülerlabor-Angebote sowie die Angebote im Citizen-Science-

Format müssen systematisch und auf der Grundlage von etablierten fachdidaktischen Konzepten entwickelt werden. Hierzu wird das Modell der Didaktischen Rekonstruktion (Duit et al. 2012) eingesetzt. Das Modell repräsentiert eine konstruktivistische Sicht auf das Lernen und Lehren. Folglich sind für die didaktische Strukturierung der Angebote zwei zentrale Vorarbeiten relevant: Das ist zum einen die fachliche Klärung der Inhalte und zum anderen die empirische Beforschung der diesbezüglichen Denk- und Erfahrungswelten von künftigen Adressat:innen der Angebote. Nur durch Kenntnis von beidem ist es möglich, didaktische Strukturierungen zu entwickeln, die sowohl der fachlichen Sicht als auch der Sicht der Lernenden auf nachhaltigkeitsbezogene Herausforderungen im Kontext der nachhaltigen Wasserversorgung gerecht werden. Beide Vorarbeiten werden im Folgenden vorgestellt.

3.1. Fachliche Klärung

Die fachliche Klärung des im Projekt zu thematisierenden Inhaltsbereichs erfolgt durch eine literaturbasierte Analyse. Ziel ist eine Elementarisierung (Bleichroth, 1991), also das Herausarbeiten von physikalischen Grundideen. Diese müssen zwangsläufig von den Lernenden erarbeitet werden, um Phänomene, die im Kontext von wasserbezogenen Herausforderungen der nachhaltigen Entwicklung auftreten, entschlüsseln zu können. Bei der Elementarisierung werden also durch die Analyse und den Vergleich von wasserbezogenen Phänomenen wiederkehrende Muster in den Sachstrukturen identifiziert, die auf physikalische Grundprinzipien und -ideen hindeuten. Die folgende Tabelle ist im Zuge der Elementarisierung (vgl. Meyer, 2025) entstanden. Dort werden exemplarisch wasserbezogene Phänomene und die Elementaria gegenübergestellt.

Tab. 1: Elementaria nebst wasserbezogenen Phänomenen

Elementarium	Phänomenologische Manifestation
Strömungen entstehen durch Differenzen in Höhe, Druck und Temperatur. Die Strömungsgeschwindigkeit ist abhängig von der Stoffmenge und dem Querschnitt des Rohrs/Kanals.	Druckunterschiede im Flussbett (vor allem bei Einengungen) erhöhen die Strömungsgeschwindigkeit; wenn Flüsse oder Kanäle zu schmal sind, steigt der Wasserspiegel → Überschwemmung.
Verdunstung von Wasser benötigt Energie.	Wenn viel Wasser verdunstet (z. B. über dem Meer oder feuchten Tropen), wird Energie in der Atmosphäre gespeichert. Diese wird bei Kondensation (z. B. in Gewitterwolken) wieder freigesetzt →

	Starkregen, Gewitter, Überschwemmungen.
Das Emissionsvermögen eines Körpers steigt mit seiner Temperatur sowie mit dunkleren Farben und raueren Oberflächen. Helle, glatte Oberflächen reflektieren mehr Wärmestrahlung. Feuchte Oberflächen können das Emissionsvermögen erhöhen, da Wasser eine hohe Emissivität besitzt.	Wärmestrahlung von verschiedenen Böden tragen zur Verdunstung bei. Positive Rückkopplungen resultieren: Der Boden ist trocken → weniger Verdunstung → Temperatur des Bodens steigt → Hitzeperioden und Dürren verstärken sich.
Der Sättigungsdampfdruck eines Gases variiert mit der Temperatur (Clausius-Clapeyron-Effekt).	Die Wasserspeicherkapazität von Luft ist temperaturabhängig. Warme Luft speichert mehr Feuchtigkeit → wenn sie abkühlt → plötzliche, starke Niederschläge (Extremwetterereignisse).

Die Beispiele verdeutlichen, dass grundsätzlich physikalische Prinzipien (Elementaria) in der Lage sind, viele bedeutende, nachhaltigkeitsrelevante Phänomene – insbesondere solche, die positiven Rückkopplungen unterliegen – zu erklären. Solche Elementaria sind daher im Projekt „AquaCitizens“ von besonderem Vermittlungsinteresse. Darüber hinaus wurde im Zuge der fachlichen Klärung an drei Beispielen herausgearbeitet, welche globalen Herausforderungen durch den Eingriff des Menschen (inkl. Klimawandel) in den natürlichen Wasserkreislauf resultieren:

- Der menschliche Eingriff in den natürlichen Wasserkreislauf erhöht den Wasserstress. Es resultieren Extremwettersituationen (Dürre, Nässe). Hieraus resultiert der Bedarf nach einem Wassermanagement, das diese negativen Folgen abfedert.
- Der menschliche Eingriff in den natürlichen Wasserkreislauf führt zu einer Abnahme der Wasserqualität. Hieraus resultiert der Bedarf nach einer Wasseraufbereitung (Wasserwerke, Klärwerke).
- Erhöhung des Wasserstress und Abnahme der Wasserqualität führen zu Verteilungskämpfen um die Ressource Wasser. Hieraus resultiert der Bedarf, die negativen wirtschaftlichen und sozialen Folgen zu lindern.

3.2. Erfassung von Lernendenperspektiven

Im Hinblick auf „AquaCitizens“, das zur Realisierung einer tBNE eine Brücke zwischen Citizen-Science und einer physikalischen Sicht auf wasserbezogene, nachhaltigkeitsrelevante Phänomene zu schlagen versucht, sind entsprechend zwei Forschungsfragen formuliert worden:

F1: Welche Rolle spielen im Kontext von Citizen-Science Dokumentation, Austausch und Forschung für Jugendliche im Umgang mit wasserbezogenen Herausforderungen und welchen Partizipations- und

Einflussmöglichkeiten sehen sie diesbezüglich für sich? (→ Suchrichtung: Citizen-Science)

F2: Wie nehmen Kinder und Jugendliche wasserbezogene Phänomene und Herausforderungen (z. B. Dürre, Nässe) wahr, welches Wissen haben sie darüber? (→ Suchrichtung: Wasserphänomene)

3.2.1. Forschungsstand

Für alle drei in den Forschungsfragen genannten Bereiche wurde zunächst Literatur recherchiert und ausgewertet. Die Ergebnisse werden im Folgenden entlang der Forschungsfragen vorgestellt.

3.2.1.1. Wahrnehmung der Bedeutung von Citizen-Science und Partizipation (F1)

In der Literatur wird Citizen-Science meist als ein Format dargestellt, das aufgrund seiner Gestaltung Partizipation erwarten lässt. Daraus folgend wird angenommen, dass die Partizipation der Teilnehmenden zu einem forschenden Lernen führe, das wiederum die Motivation und den Erkenntnisgewinn der Teilnehmenden fördere. Allerdings wird diese Annahme meist nicht durch empirische Daten, wie z. B. die Befragung der Teilnehmenden, untermauert (Beispiel: Sturm et al., 2020). Hinsichtlich der Motivation der Teilnehmenden sowie ihrer Vorstellungen zur Sinnhaftigkeit vom Citizen-Science besteht aktuell nur eine begrenzte Forschungslage. In einigen sehr breit angelegten Citizen-Science-Projekten wie von West und Pateman (2016) oder Blöbaum (2012) werden im Vorfeld leider keine Befragungen der Teilnehmenden zu ihren Partizipationswünschen durchgeführt. In einem der wenigen Projekte, in dem entsprechende Untersuchungen durchgeführt wurden (Moczek, 2018), wurden von den Teilnehmenden vor allem gemeinnützige Motive wie Naturschutz und gesellschaftspolitische Verantwortung benannt; teilweise auch persönliche Motive wie eine zusätzliche Qualifizierung. Interessant ist zudem die Erkenntnis von Rotman et al. (2012): Sie betonen, dass Bürger:innen die Nützlichkeit einer Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft und Gesellschaft höher einschätzen als die beteiligten Wissenschaftler:innen.

Aus den Kinderreporten geht hervor, dass Kinder und Jugendliche mit enormer Mehrheit (2016 bis 2018 stets nahe 95%; vgl. Baumgardt, 2022, S. 31) dafür plädieren, in ihrem sozialen Umfeld mehr mitbestimmen zu dürfen. Dem Item „Kinder und Jugendliche sollten in Deutschland bei politischen Entscheidungen mehr mitbestimmen dürfen“ (Hanke et al., 2024, S. 35 f.) wird mit 71% zugestimmt. Mehrere Studien weisen darauf hin, dass Kinder deutlich kompetentere Akteure sind als angenommen (Abendschön & Tausendpfand, 2017; Brügelmann, 2022; Götzmann, 2015). Die aktuelle SINUS-Jugendstudie zeigt, dass insbesondere das Themenfeld Klimawandel von Jugendlichen als Gemeinschaftsaufgabe verstanden wird. Dennoch sei nur der Zusammenschluss vieler Menschen wirkungsmächtig. Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit, sich mit Gleichgesinnten zu

vernetzen, um Veränderungen anzustoßen und Aufmerksamkeit für das Thema zu schaffen. Im Vergleich zu anderen Themen besteht bei Klima und Umwelt der größte Wunsch nach Mitsprache aber auch großes Frustrationspotenzial. Hinderlich für Partizipation ist, dass viele Jugendliche das Gefühl haben, dass ihnen Kompetenz und Erfahrung abgesprochen und dass ihnen von Erwachsenen nicht auf Augenhöhe begegnet werde. Das Zusammenfinden Gleichgesinnter reduziere die Barrieren und verstärke die Motivation. Dass andere mitmachen, ist für die Jugendlichen die wichtigste Rahmenbedingung, um sich einbringen zu wollen und das Gefühl zu haben, etwas bewirken zu können (vgl. Calmbach et al., 2024, S. 264 ff.).

3.2.1.2. Vorstellungen von wasserbezogenen, Phänomenen und Herausforderungen (F2)

Die Forschungslage zu physikbezogenen Lernendenvorstellungen von wasserbezogenen Phänomenen und Herausforderungen der nachhaltigen Entwicklung ist ebenfalls dürftig. Folgende Lernendenvorstellungen konnten recherchiert werden:

Erosion wird von den Lernenden als physikalischer Prozess verstanden, der nicht mit dem Wetter in Verbindung gebracht wird und permanent stattfindet. Das wichtigste Merkmal der Erosion wird in der Bewegung und in dem Transport von Kleinteilen gesehen (Dove, 1997). Als Ursachen werden bspw. das Einsacken des Bodens durch zu viel Wasser, der Abtrag, das Abspülen und der Abfluss, sowie Wunden im Boden, Verdunstungen und Vorgänge, die tiefer im Boden erfolgen, gesehen (vgl. Drieling, 2015, S. 163).

Hinsichtlich Überschwemmungen existiert eine Vorstellung, die als Badewannentheorie bezeichnet wird: Lernende nehmen an, dass alle Gewässer wie Gefäße funktionieren, bei denen der Wasserspiegel steigt, bis das Gefäß überläuft. Es wird nicht unterschieden zwischen dynamischen Systemen wie Flüssen und statischen Systemen wie Seen. Faktoren wie das Fließgleichgewicht, der Abfluss, die Verdunstung, der Zufluss werden hierbei nicht berücksichtigt. Daraus folgt die Ansicht, dass ohne Niederschlag, die Wassermenge in dem Gefäß gleichbleibt (vgl. Althoff et al., 2021, S. 12 f.). Bezüglich Dürren und Desertifikation konnte die Schülervorstellung ermittelt werden, dass der Wasserverbrauch entscheidend für den Wassermangel ist. Ebenfalls wird die Erhöhung der Temperatur durch den Klimawandel für Dürren verantwortlich gemacht; weitergehende Prozesse werden nicht betrachtet (Schubert, 2013).

3.2.2. Untersuchungsmethodik

Da der Umfang der recherchierten Literatur relativ klein war, wurde in Ergänzung beschlossen, eine eigene empirische Untersuchung durchzuführen. Eingesetzt wurden hierbei problemzentrierte Interviews nach Witzel und Reiter (2022). Die Problemzentrierung ist erstens bezogen auf die relevante gesellschaftliche Problemstellung der wasserbezogenen

Nachhaltigkeitsherausforderungen. Zweitens ist sie bezogen auf die methodische Zentrierung, also die Optimierung der Explikationsmöglichkeiten der Interviewten (vgl. Witzel & Reiter, 2022, S. 64). Bei dieser Interviewform spielt das aktive Nachfragen durch den Interviewer eine wichtige Rolle, um ein verständnisvolles Interpretieren zu ermöglichen (vgl. Witzel & Reiter, 2022, S. 50 ff.). Die Interviewten werden durch offen gestellte Fragen dazu angehalten, ihre Gedankengänge in sogenannten Erzählungen darzustellen. Zur Strukturierung des Interviews wird ein Leitfaden eingesetzt, der zu allen drei relevanten Forschungsfragen entsprechende Interviewfragen enthält. Der Leitfaden ist Meyer (2025) zu entnehmen. Es wurden 14 Interviews mit Paaren durchgeführt, sodass die Äußerungen von 29 Personen der 7.-9. Klasse an IGS und Gymnasien aufgenommen wurden. Die Interviewlänge beträgt durchschnittlich 38 ± 10 Minuten.

Alle Interviews wurden transkribiert. Die Transkription der Interviews erfolgte gemäß Dresing und Pehl (vgl. 2013, S. 21 ff.). Die Transkripte wurden sodann einer kategoriengeleiteten, inhaltlich strukturierenden qualitativen Inhaltsanalyse mit typenbildenden Ergänzungen unterzogen (Kuckartz, 2018). Die Bildung der Kategorien wird hierbei durch Gemeinsamkeiten und Disparitäten zwischen den Interviewfällen geleitet; damit die Kontraste zwischen Mehrheits- und die Minderheitsmeinungen herausgeschält werden können. Die Erklärungs- und Deutungsmuster der Interviewten stellen also in ihrer Subjektivität die Ergebnisse der Erhebung dar (Vogt & Werner, 2014).

3.2.3. Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse je nach Forschungsfrage wiedergegeben. Dabei wird zunächst das Ergebnis der Literaturrecherche vorgestellt und im Anschluss dann jene Erkenntnisse, die sich aus den ergänzenden Interviews gewinnen ließen.

3.2.3.1. Wahrnehmung der Bedeutung von Citizen-Science und Partizipation (F1)

Nahezu alle Interviewten möchten beteiligt werden und wünschen sich, dass ihnen mehr zugehört wird. Für alle ist der erste Bezugsrahmen, in dem sie gestalten können und wollen, das soziale Umfeld, insbesondere die Schule. Geht es darüber hinaus um Beteiligung im politischen Bereich, möchten sich einige nicht mehr beteiligen. Insgesamt waren jedoch viele Lernende vertreten, die das Gefühl haben, ihnen würde Kompetenz abgesprochen und Erwachsene würden ihnen nicht auf Augenhöhe begegnen. Das Bedürfnis nach Partizipation zeigte sich vor allem mit Blick auf den Klimawandel. Unterstrichen wurde – wie in der Literatur – dass nur der Zusammenschluss vieler Menschen Wirksamkeit zu entfalten vermag. Als Motive für die Beteiligung an Citizen-Science-Projekten wurde in Einklang mit den Erkenntnissen von Moczek (2018) der Naturschutz, die gesellschaftliche Verantwortung und die eigene Qualifizierung

benannt. Es ließen sich in der Studie jedoch auch Diskrepanzen zu den in der Literatur dargelegten Erkenntnissen ausmachen: Viele Interviewte waren von der Nützlichkeit von Citizen-Science – im Gegensatz zu den Darlegungen von Rotman et al. (2012) – nicht überzeugt. Eine mögliche Erklärung ist, dass durch die Teilnahme an einem Citizen-Science-Projekt eine diesbezügliche Wahrnehmungsänderung auftritt. Als besonders bedeutsam nehmen die Lernenden die Rolle der Wissenschaftler:innen wahr. Ihnen wird zugeschrieben, die Maßnahmen zu entwerfen und mit der Öffentlichkeit und Entscheidungsträgern zu kommunizieren. Diese Darlegung entspricht dem WGBU-Gutachten, in dem die proaktive Rolle der Wissenschaft betont wird, die die Politik und die Stakeholder zusammenbringen soll (vgl. WBGU, 2024, S. 269).

3.2.3.2. Vorstellungen von wasserbezogenen, Phänomenen und Herausforderungen (F2)

Durch die Studie konnten viele bedeutsame Laienvorstellungen identifiziert werden, die mit den Elementaria korrespondieren und somit eine notwendige Grundlage für die angestrebte Didaktische Rekonstruktion darstellen.

Den Lernenden ist der Wasserkreislauf gut bekannt. Allerdings sind sie der festen Überzeugung, dass das Wasser auf der Erde nicht weniger werden kann. Die Unterscheidung zwischen den verschiedenen Aggregatzuständen, in denen Wasser auf der Erde vorkommt, ist für die Lernenden unwichtig; für sie dominiert gedanklich im Hinblick auf Wasser der flüssige Aggregatzustand. Ferner nehmen sie den Wasserkreislauf als ortsunabhängig wahr; für sie scheint der Unterschied zwischen lokalem und globalem Wasserhaushalt für Deutschland nicht relevant zu sein. Sehr präsent ist in ihrer Wahrnehmung der Klimawandel als Verursacher der wasserbezogenen Herausforderungen. Die Lernenden sind diesbezüglich der Auffassung, dass allgemein bekannte Klima- und Umweltschutzmaßnahmen auch die wasserbezogenen Herausforderungen lösen können. Bemerkenswert ist, dass die Interviewten mit einer Zunahme bedrohlicher Überschwemmungen infolge des Klimawandels rechnen, während mögliche Dürren nicht in vergleichbarer Weise als Bedrohung wahrgenommen werden.

3.2.4. Zusammengefasste Vorstellungen

Folgende zehn zentrale Lernendenvorstellungen wurden durch die Studie ermittelt:

- a) Das Wasser befindet sich im bekannten Wasserkreislauf und kann somit nicht weniger werden.
- b) In welcher Form das Wasser vorkommt (Süß-/Salzwasser, Aggregatzustand) ist eher unwichtig. Der Aggregatzustand ändert sich wieder. Die Umwandlung von Salz- in Süßwasser ist möglich.
- c) Der Unterschied zwischen lokalem und globalem Wasserhaushalt ist für Deutschland unwichtig; der Wasserkreislauf ist demnach ortsunabhängig.

- d) Überschwemmungen sind in der Gegenwart und Zukunft häufiger und intensiver; sie sind eine größere Herausforderung als Dürren.
- e) Der Klimawandel ist der Verursacher wasserbezogener Herausforderungen.
- f) Allgemein bekannte, ungerichtete Klima- und Umweltschutzmaßnahmen sind auch hilfreich bei wasserbezogenen Herausforderungen.
- g) Der Unterschied von Mittelbarkeit und Unmittelbarkeit der Wirkung der Gegenmaßnahmen erscheint unwichtig bei der Lösung von wasserbezogenen Herausforderungen.
- h) Kinder und Jugendliche fühlen sich nicht wirkmächtig. Sie können höchstens kommunizieren und auf Probleme sowie mögliche Lösungen aufmerksam machen. Sie selbst können die Probleme nicht lösen – das können nur Erwachsene.
- i) Ein wichtiges Erkennungsmerkmal von Dürren sind aus Lernendensicht die Gegenmaßnahmen.
- j) Grundwasser ist eine unerschöpfliche Ressource.

4. Konsequenzen für didaktische Strukturierungen von Bildungsangeboten in „AquaCitizens“

Auf der Grundlage der Erkenntnisse zur fachlichen Sicht und zur Lernendensicht lassen sich erste Konsequenzen für didaktische Strukturierungen der Bildungsangebote in „AquaCitizen“ ziehen:

Um der Dürre den gleichen Stellenwert beizumessen wie den Überschwemmungen, ist es sinnvoll, den Zusammenhang zwischen der Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Dürren und Überschwemmungen aufzuzeigen. Die Verknüpfung beider Phänomene muss hierbei über ein tiefgehendes Verständnis des Wasserkreislaufs erfolgen. Das grundlegende, in der Schule besprochene Modell des Kreislaufs reicht hierzu nicht aus, weil die verfügbare Menge an Wasser von den Lernenden nicht als relevant wahrgenommen wird. Diesbezüglich ist auch die Wasserqualität, die sich klimawandel- und unmittelbar menschenbedingt (z. B. durch Schmutzwasser) verschlechtert, von Bedeutung. Diesbezüglich muss das Modell des einfachen Wasserkreislauf hinsichtlich der Auswirkungen von menschlichem Handeln, der klimawandelbedingten Temperaturerhöhung und der Intensivierung und Beschleunigung erweitert werden. → Berücksichtigte Vorstellungen: a), c), d), e) und i).

Eine bedeutsame Vorstellung, die in Bildungsprozessen potenziell hinderlich wirkt, ist die Auffassung, Grundwasser stehe unbegrenzt zur Verfügung. Aus diesem Grund nehmen Lernende Dürren als ein geringeres Problem wahr als Nässe. Hier ist also in den Angeboten so didaktisch zu strukturieren, dass ein Konzeptwechsel erfolgt. Diese muss die Ausgangsbasis für die Thematisierung von Dürren und deren Auswirkungen dienen. → Berücksichtigte Vorstellungen: b), j) und d).

Ebenfalls muss es Ziel der Angebote sein, die Lernenden zu problemorientierten Maßnahmen im Klima-, Umwelt- und Menschenschutz zu führen, um typische Maßnahmen wie die Verringerung des Kohlenstoff-

dioxidausstoßes nicht als Allheilmittel zu verstehen. Obwohl allgemeines Interesse für den Klimawandel aufseiten der Jugendlichen besteht, muss im Projekt vor allem auf ein Unterthema des Klimawandels – die wasserbezogenen Herausforderungen – fokussiert werden. Es ist daher empfehlenswert, in den Angeboten mit der Bedeutung des Klimawandels für wasserbezogene Herausforderungen zu beginnen, dann jedoch zügig auf Maßnahmen zu sprechen zu kommen, die sich speziell auf das nachhaltige Wassermanagement beziehen. → Berücksichtigte Vorstellungen: f) und g).

Citizen-Science und tBNE bewegen sich zwischen Realismus und Idealismus. Die Lernenden glauben tendenziell nicht, dass sie etwas bewirken können und sich andere Menschen für ihr Denken und Handeln interessieren. Gleichzeitig fordern sie zurecht ein, dass ihre Ideen ernst genommen werden. Die Angebote in „AquaCitizens“ müssen die Handlungsspielräume aufzeigen, ohne unbegründete Hoffnungen zu schüren, die dann enttäuscht werden. Auf der physikalischen Ebene sollen sich die Lernenden kompetent erfahren, um ihre Selbstwirksamkeitserwartung zu stärken. Ziel des Projekts sollte es deshalb auch sein, dass die Lernenden erkennen, was sie selbst leisten können, ohne auf Erwachsene und höhere Stellen angewiesen zu sein. Daraufhin können sie selbstbewusst den Schritt an höhere Stellen gehen. Es ist eine bedeutende Erkenntnis der Interviews, dass die SuS den Eindruck haben, dass sie von Erwachsenen nicht als wichtig und fähig wahrgenommen werden und es zu einer starken Abgrenzung zu den Erwachsenen kommt. Interessant wäre es, diese Haltungen am Ende des Projekts im Hinblick darauf zu überprüfen, inwieweit sich diese Einschätzung geändert hat. → Berücksichtigte Vorstellung: h).

5. Literatur

- Abendschön, S. & Tausendpfand, M. (2017). Political knowledge differences between children. *American Behavioral Scientist*, 61(2), 204-221.
- Althoff, J., Fögele, J. & Mehren, R. (2021). *Geobox Überschwemmung. Schwerpunkt Modellkompetenz: Gymnasium, Sekundarstufe II*. Justus-Liebig-Universität Gießen.
- Balsiger, J., Förster, R., Mader, C., Nagel, U., Sironi, H., Wilhelm, S. & Zimmermann, A. B. (2017). Transformative Learning and Education for Sustainable Development. *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society*, 26(4), 357–359.
- Baumgardt, I. (2022). Demokratische Grundschule. In I. Baumgardt & D. Lange (Hrsg.), *Young citizens: Handbuch politische Bildung in der Grundschule* (S. 29-38). Bundeszentrale für politische Bildung.
- Bleichroth, W. (1991). Elementarisierung, das Kernstück der Unterrichtsvorbereitung. *Naturwissenschaft im Unterricht. Physik*, 2(6), 4-11.
- Blöbaum, A. (2012). Förderpotenziale des weiblichen Nachwuchses in Naturschutzvereinen und naturwissenschaftlichen Vereinen. *Naturschutz und Biologische Vielfalt*, 123, 227-242.

- Brügelmann, H. (2022). Politische Bildung in der Grundschule. Eine Bestandsaufnahme. In I. Baumgardt & D. Lange (Hrsg.), *Young citizens: Handbuch politische Bildung in der Grundschule* (S. 87-96). Bundeszentrale für politische Bildung.
- Calmbach, M., Flaig, B. B., Möller-Slawinski, H. & Schleer, C. (2024). *SINUS-Jugendstudie 2024. Lebenswelten von Jugendlichen im Alter von 14 bis 17 Jahren in Deutschland*. Bundeszentrale für politische Bildung.
- Deci, E. L. & Ryan, R. M. (2012). Motivation, personality, and development within embedded social context: An overview of self-determination theory. In R. M. Ryan (Ed.), *Oxford handbook of human motivation* (pp. 85-107). Oxford University Press.
- Dove, J. (1997). Student ideas about weathering and erosion. *International Journal of Science Education*, 19(8), 971-980.
- Dresing, T. & Pehl, T. (2013). *Praxisbuch Interview, Transkription & Analyse. Anleitungen und Regelsysteme für qualitative ForscherInnen*. Eigenverlag.
- Drieling, K. (2015). *Schülervorstellungen über Boden und Bodengefährdung. Ein Beitrag zur geographiedidaktischen Rekonstruktion*. Verlags-haus Monsenstein und Vannerdat OHG.
- Duit, R., Gropengießer, H., Kattmann, U., Komorek, M. & Parchmann, I. (2012). The Model of Educational Reconstruction – a Framework for improving Teaching and learning Science. In: D. Jorde & J. Dillon (Hrsg.), *Science Education Research and Practice in Europe* (S. 13-37). Sense Publishers.
- Götzmann, A. (2015). *Entwicklung politischen Wissens in der Grundschule*. SpringerVS.
- Hanke, K., Hofmann, H., Kamp, U., Krüger, T., Mischko, T. & Ohlmeier, N. (2024). *Demokratiebildung in Deutschland. Kinderreport Deutschland*. Deutsches Kinderhilfswerk.
- Höft, L. (2020). *Die Entwicklung des Interesses an naturwissenschaftlichen Tätigkeiten: Quer- und längsschnittliche Analysen zu Verlauf und Einflussfaktoren der Interessenentwicklung im Chemieunterricht der Sekundarstufen I und II*. Dissertation: Universität Kiel.
- Komorek, M. & Schmitz, J. D. (2023). Physik im Jugendzentrum. In LernortLabor (Hrsg.), *Ease Corona - das Förderprogramm für Schülerlabore* (S. 48-57). LernortLabor e.V.
- Kuckartz, U. (2018). *Qualitative Inhaltsanalyse: Methoden, Praxis, Computerunterstützung*. Beltz Juventa.
- Lewalter, D. & Greyer, C. (2009). Motivationale Aspekte von schulischen Besuchen in naturwissenschaftlich-technischen Museen. *Zeitschrift für Erziehungswissenschaft*, 12, 28-44.
- Meyer, T. (2025). *Interviewstudie mit Jugendlichen zur transformativen BNE im Kontext Wasserversorgung und Umgang mit Wasser. Wissen und Einschätzung von Problematiken und Herausforderungen*. Masterarbeit: Universität Oldenburg.
- Moczek, N. (2018). Motivationen für freiwilliges Engagement im Citizen-Science-Projekt "Wildkatzensprung". *Natur und Landschaft*, 93(4), 176-181.
- Rotman, D., Preece, J., Hammock, J., Procita, K., Hansen, D., Parr, C., Lewis, D. & Jacobs, D. (2012). Dynamic changes in motivation in collaborative citizen-science projects. In S. Poltrock, C. Simone, J. Grudin, G. Mark & J. Riedl (Hrsg.), *Proceedings of the ACM 2012 Conference on Computer Supported Cooperative Work and Companion* (S. 217-226). Association for Computing Machinery.
- Schild, K., Leng, M. & Hammer, T. Die Rolle von Transformativem Lernen für eine Bildung für Nachhaltige Entwicklung an der Hochschule. *Bulletin/Vereinigung der Schweizerischen Hochschuldozierenden*, 45(2), 34-40.
- Schubert, J. C. (2013). Schülervorstellungen zur Desertifikation. Ergebnisse einer qualitativen Interviewstudie zu vorunterrichtlichen Vorstellungen von Schülerinnen und Schülern der 7. Klasse. *Zeitschrift für Geographiedidaktik*, 41(4), 173-196.
- Sturm, U., Voigt-Heucke, S., Mortega, K. G. & Moormann, A. (2020). Die Artenkenntnis von Berliner Schüler_innen am Beispiel einheimischer Vögel. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 26(1), 143-155.
- Vare, P. (2014). *Are There Inherent Contradictions in Attempting to Implement Education for Sustainable Development in Schools?* Dissertation: University of Bath.
- Vare, P. & Scott, W. (2007). Learning for a Change. *Journal of Education for Sustainable Development*, 1(2), 191-198. <https://doi.org/10.1177/097340820700100209>
- Vogt, S. & Werner, M. (2014). *Forschen mit Leitfadeninterviews und qualitativer Inhaltsanalyse*. Skript: Fachhochschule Köln.
- WBGU – Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderung (2011). *Welt im Wandel – Gesellschaftsvertrag für eine große Transformation*. WBGU.
- WBGU – Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderung. (2024). *Hauptgutachten: Wasser in einer aufgeheizten Welt*. WBGU.
- West, S. & Pateman, R. (2016). Recruiting and Retaining Participants in Citizen Science: What Can Be Learned from the Volunteering Literature? *Citizen Science: Theory and Practice*, 1(2), 1-10.
- Witzel, A. & Reiter, H. (2022). *Das problemzentrierte Interview: Eine praxisorientierte Einführung*. Beltz Juventa.

Danksagung

Wir danken der Deutschen Bundesstiftung Umwelt für die ideelle und finanzielle Förderung des Projekts

Unterstützung in der Studieneingangsphase - Der Reformstudiengang Physik Plus -

Christina Lüders*, Stefan Roth⁺, Heidrun Heinke*

*I. Physikalisches Institut IA, RWTH Aachen University

⁺Lehrstuhl für Experimentalphysik III B, RWTH Aachen University
lueders@physik.rwth-aachen.de

Kurzfassung

Besonders in MINT-Studiengängen sind hohe Abbruchquoten zu verzeichnen. Laut Neugebauer et al. (2019) erfolgen 47 % aller Studienabbrüche in den ersten beiden Fachsemestern. Unterstützungsmaßnahmen sollten daher in der Studieneingangsphase ansetzen. An der RWTH Aachen wird seit dem WS 2020/21 neben Physik (Bachelor und Lehramt) auch der Reformstudiengang Physik Plus angeboten. Dieser verlängert das Bachelorstudium auf acht Semester, wodurch in der Studieneingangsphase ergänzende Veranstaltungen möglich sind. Seit dem WS 2019/20 wurden sukzessive Daten in der Studieneingangsphase der Physikstudiengänge erhoben um Eingangsvoraussetzungen, Wahrnehmungen und Wünsche der Studierenden zu erfassen. Die Daten wurden in Form von Fragebögen und Interviews erhoben. Die Befragung hat ergeben, dass sich die Studierenden der unterschiedlichen Studiengänge signifikant in ihren Eingangsvoraussetzungen unterscheiden. Die ergänzenden Interviews ermöglichen einen tiefergehenden Einblick in die Wahrnehmungen und Wünsche der Studierenden des Studiengangs Physik Plus. In dem Beitrag wird der Studiengang Physik Plus mit aktuellen Studierendenzahlen vorgestellt sowie ein Einblick in die Eingangsvoraussetzungen, Wahrnehmungen und Wünsche dieser Studierenden gegeben.

1. Ausgangssituation

Die Abbruchquoten in den MINT-Studiengängen spielen eine immer wichtigere Rolle bei der Ausbildung an Hochschulen (Heublein et al., 2017). Ein großer Teil der Studienabbrüche passiert in der Studieneingangsphase (Heublein, 2014). Ein Grund hierfür kann beispielsweise sein, dass die Studierenden heterogen bzgl. ihrer Vorkenntnisse sind (Trautwein et al. 2007). Die Studieneingangsphase stellt die Studierenden aber nicht nur in fachlicher Hinsicht vor eine Herausforderung, sondern auch in personaler Hinsicht. Insbesondere der Übergang von Schule zur Hochschule erfordert eine hohe Selbstregulationsfähigkeit (Schiefele & Wild, 2013). Außerdem verändern sich die Studienanfänger:innen – besonders der Umgang mit Bildung und Belastung unterscheidet sich zwischen Studierendengenerationen. Dies spiegelt sich in veränderten Erwartungshaltungen und Lernstrategien wider (Beck, 2017).

Die Einflussfaktoren auf den Studienerfolg werden in der Literatur durch unterschiedliche Modelle beschrieben. In den aktuellen Modellen sind auch die Eingangsvoraussetzungen und Kontextbedingungen der Studierenden von Bedeutung (z.B. Sumfleth & Leutner, 2020). Ein Studienerfolgskriterium stellt die Studierzufriedenheit dar (de Lourdes Machado et al, 2011). Studierzufriedenheit wird nach Hiemisch (2005) mit unterschiedlichen Subkomponenten definiert. Hierbei differenziert er zwischen einer Zufrie-

denheit mit den Studieninhalten, den Studienbedingungen und der Zufriedenheit mit der Bewältigung von Studienbelastung.

Weitere Prädiktoren für Studienerfolg sind besonders in den Eingangsvoraussetzungen und Kontextbedingungen zu finden. Der am meisten untersuchte und diskutierte Prädiktor für Studienerfolg ist die Abiturnote (Trapmann et al., 2007). Auch die letzte Physik-Schulnote korreliert mit dem Bestehen der Klausuren in der Studieneingangsphase (Sorge et al, 2016). In mathematisch-naturwissenschaftlichen Studiengängen ist auch die Mathematiknote von hoher Bedeutung (Trapmann et al., 2007). Jedoch wird zunehmend betont, dass rein kognitive Eingangsvoraussetzungen nicht ausreichen, um den Studienerfolg umfassend zu beschreiben (Robbins et al., 2004).

Soziodemographische Daten, wie das Geschlecht der Studierenden, sind weniger gut erforscht. Einen Zusammenhang zwischen Studienerfolg und Geschlecht sieht Blömeke (2008) eher beim Fähigkeitsselbstkonzept. Dieses kann bei weiblichen Studierenden in naturwissenschaftlichen Studiengängen geringer ausfallen und kann sich negativ auf die Studienmotivation und das Durchhaltevermögen auswirken. Da auch weitere Kontextbedingungen, wie z.B. der Wohnort der Studierenden, einen Einfluss auf den Studienerfolg haben, liegt es nahe, dass Eingangsvoraussetzungen und Kontextbedingungen von Studierenden in der Studieneingangsphase erfasst werden sollen. Hierbei ist auf eine standortabhängige Untersuchung

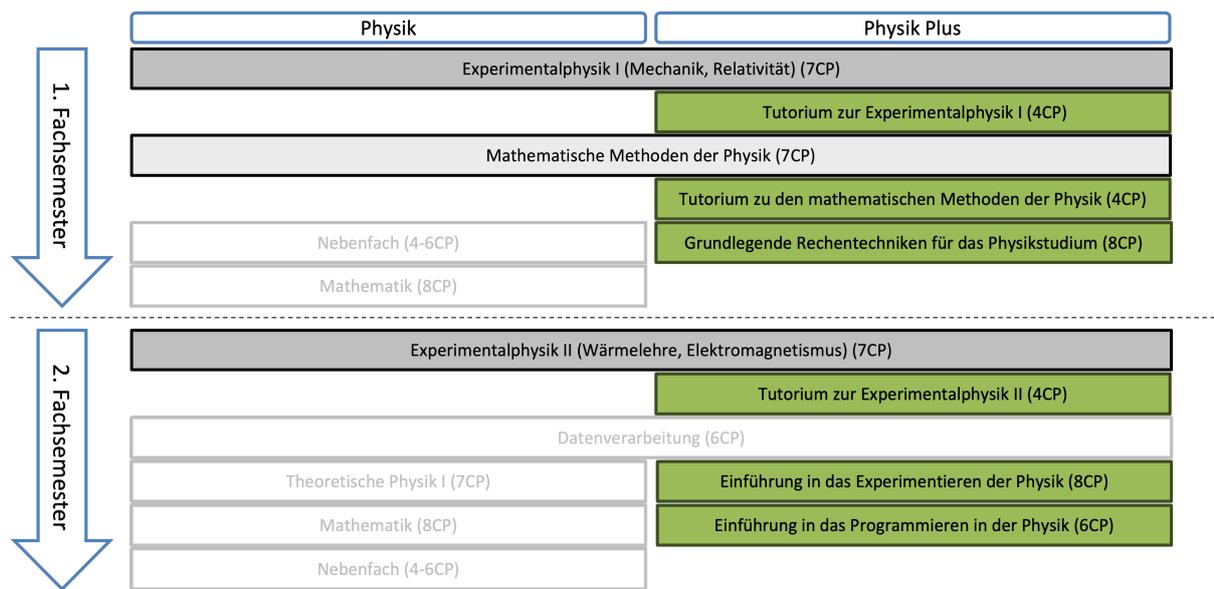


Abb. 1: Beispielhafter Vergleich der Studiengangphase des klassischen Bachelorstudiengangs Physik und des Reformstudiengangs Physik Plus (Stand WS 2022/23). Quelle: Eigene Darstellung.

zu achten, da regionale Unterschiede in der Hochschullandschaft sowie soziale und infrastrukturelle Faktoren einen maßgeblichen Einfluss auf den Studienerfolg haben können (Haak, 2017).

Ansätze zur Unterstützung von Studierenden müssen somit schon in der Eingangsphase des Studiums ansetzen. An der RWTH Aachen wird neben dem klassischen Bachelorstudiengang Physik auch der Reformstudiengang Physik Plus angeboten. Dieser Studiengang zielt darauf ab, durch zusätzliche Angebote vor allem in der Studiengangphase unter anderem den Übergang zwischen Schule und Hochschule besser zu gestalten.

2. Der Studiengang Physik Plus

Seit dem WS 2020/21 ist es an der RWTH Aachen möglich, den Reformstudiengang Physik Plus zu studieren. Im Vergleich zum klassischen 6-semesterigen Bachelorstudiengang in Physik erwerben die Studierenden den Abschluss nach acht Semestern. Die zusätzlichen 60 Leistungspunkte (Credit Points, CP) können zum Erwerb unverzichtbarer Basiskompetenzen und zur individuellen Ausgestaltung des Studiums verwendet werden. Ein Wechsel zwischen den Bachelorstudiengängen Physik und Physik Plus ist jederzeit möglich, in der Studiengangphase auch ohne eine Verlängerung der Studienzzeit.

In Abbildung 1 ist exemplarisch ein Vergleich der Studiengangphase zwischen den Studiengängen Physik und Physik Plus aus der Prüfungsordnung 2020 dargestellt. Auf der linken Seite ist der klassische Bachelorstudiengang Physik dargestellt, auf der rechten Seite der Studiengang Physik Plus. Der Schwerpunkt der Abbildung liegt auf den Grundlagenveranstaltungen zur Experimentalphysik und zur theoretischen Physik. Weitere Veranstaltungen sind aus Gründen der Übersichtlichkeit ausgegraut dargestellt.

Im ersten und zweiten Semester besuchen die Studierenden die Grundlagenveranstaltungen zur Experimentalphysik I und II sowie zu den mathematischen Methoden der Physik gemeinsam. Beide Veranstaltungen bestehen aus einer Vorlesung (4 SWS) sowie einem Übungsbetrieb (2 SWS). Die Studierenden des Studiengangs Physik Plus besuchen zusätzlich zu den Vorlesungen und Übungen ein verpflichtendes Tutorium (3 SWS). In der Veranstaltung „Grundlegende Rechentechniken für das Physikstudium“ sollen fehlende mathematische Vorkenntnisse aufgearbeitet werden. Die Veranstaltungen „Einführung in das Experimentieren in der Physik“ und „Einführung in das Programmieren“ bereiten auf weiterführende Fachveranstaltungen vor.

Im Rahmen einer Überarbeitung des Studiengangs wurden zeitliche Abläufe einzelner Veranstaltungen seit dem Start des Studiengangs im WS 2020/21 angepasst, ihre inhaltliche Struktur und Zielsetzung im Zusammenhang des Studiengangs Physik Plus bleibt jedoch bestehen.

3. Studierendenstatistik zum Studiengang Physik Plus

Die Studierendenzahlen für die Studiengänge Physik und Physik Plus sind in Abbildung 2 dargestellt. Insgesamt starten an der RWTH Aachen jährlich etwa 200 bis 250 Studierende mit dem Ziel, einen Bachelorsabschluss in Physik zu erreichen. Der Studiengang Physik Plus wird dabei im Mittel von etwa 27 % der Studierenden gewählt, wobei der Anteil bisher zwischen 19% und 32% der Physikstudierenden geschwankt hat (siehe Tabelle 1). Im ersten Jahr des Studiengangs war die Zahl mit 75 Studierenden etwas höher, in den weiteren Jahren wählten ca. 50 Studierende das Fach Physik. Einen Ausreißer stellt das Wintersemester 2023/24 dar: Hier wählten lediglich 40 Studierende den Studiengang Physik Plus.

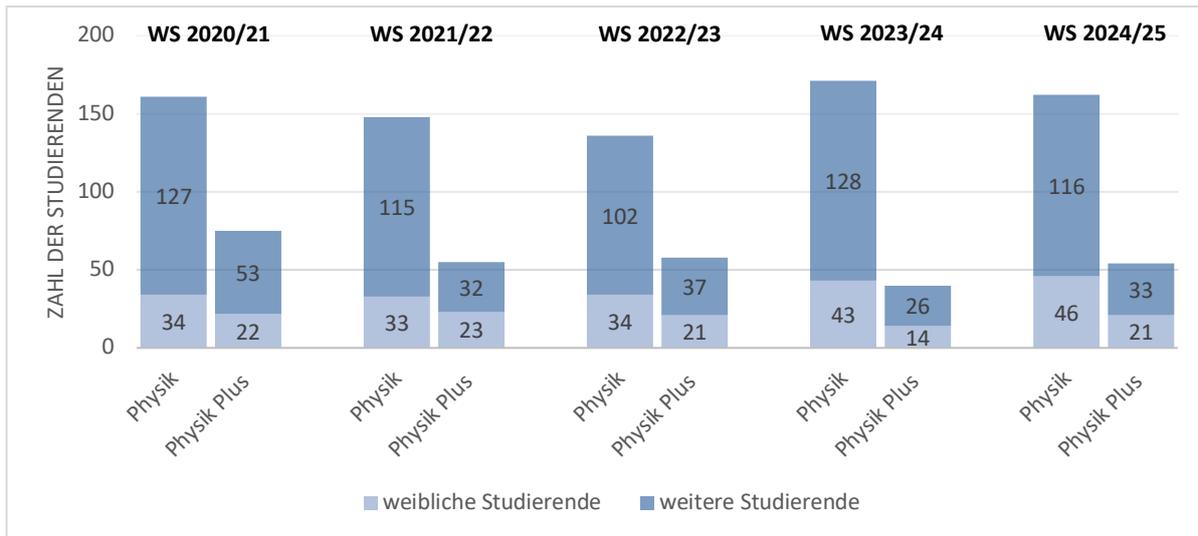


Abb. 2: Absolute Studierendenzahlen für die Studiengänge Physik und Physik Plus. In hellblau ist die Anzahl der weiblichen Studierenden dargestellt. Quelle: Eigene Darstellung.

Der Anteil dieser Gruppe war im Vergleich zur Gesamtzahl der Physikstudierenden entsprechend geringer. Bei allen dargestellten Daten handelt es sich um die statistisch erfassten Anfängerzahlen, die nicht um eventuelle sogenannte Parkstudierende bereinigt wurden (Haak, 2017).

Tab. 1: Relativer Anteil der Studienanfänger:innen für den Bachelor Physik Plus gemessen an der Gesamtzahl der Studierenden in den Bachelorstudiengängen (ohne Lehramt).

Jahr	Anteil Physik Plus
WS 2020/21	32 %
WS 2021/22	27 %
WS 2022/23	30 %
WS 2023/24	19 %
WS 2024/25	25 %
Mittlerer Anteil	27 %

Aus Abbildung 2 kann neben dem Vergleich der Zahlen der Studienanfänger:innen auch die Anzahl der weiblichen Studierenden extrahiert werden. Diese ist in Abbildung 3 dargestellt. In beiden Studiengängen wird ein relativ niedriger Anteil weiblicher Studierender sichtbar, der in Deutschland in vielen MINT-Studiengängen beobachtet wird und sich nur langsam ändert. Ein Grund hierfür kann sein, dass sich Frauen Studiengänge im MINT-Bereich weniger zutrauen. Diese Interpretation wird durch den Vergleich der Anteile weiblicher Studierender in den beiden Studiengängen zusätzlich gestützt, da der Studiengang Physik Plus nach Abbildung 3 systematisch einen höheren Anteil weiblicher Studierender hat als der Studiengang Physik. Es ist naheliegend, dass die zusätzlichen (unterstützenden) Angebote besonders für diese weiblichen Studierenden attraktiv wirken. Zusätzlich zu dem höheren Anteil weiblicher Studierender in dem Studiengang Physik Plus ist auch ein allgemeiner Trend im Physikstudiengang zu erkennen, dass der Anteil weiblicher Studierender ansteigt.

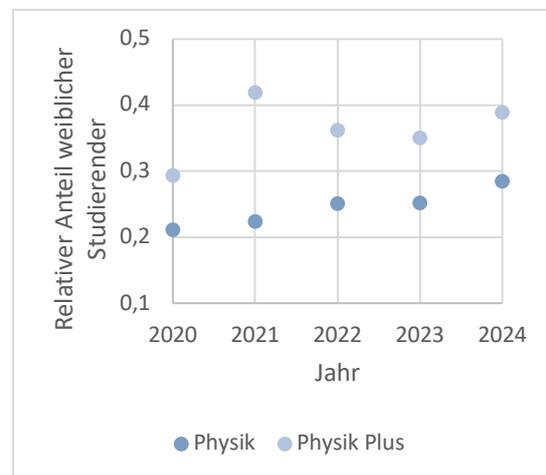


Abb. 3: Darstellung des prozentualen Anteils der weiblichen Studierender in den Studiengängen Physik (dunkelblau) und Physik Plus (hellblau) für verschiedene Jahre des Studienstart. Quelle: Eigene Darstellung.

4. Untersuchungen in der Studieneingangsphase in Physikstudiengängen an der RWTH Aachen

An der RWTH Aachen wurden vom Wintersemester 2019/20 bis zum Sommersemester 2022 sukzessive Daten von Studierenden in Physikstudiengängen in der Studieneingangsphase erhoben.

4.1. Methoden der Datenerhebung

Alle Physikstudierenden wurden durch eine Fragebogenerhebung in der Veranstaltung Experimentalphysik I zu ihren Eingangsvoraussetzungen, Wahrnehmungen und Wünschen befragt. Die Veranstaltung ist laut Studienplan für das erste Semester vorgesehen. Da auch Studierende in höheren Semestern die Veranstaltung besuchen können, sind die dargestellten Ergebnisse nicht nur die Ergebnisse von Studierenden des ersten Semesters, wenn es sich um stabile Vari-

ahlen (z.B. die Abiturnote) handelt. Ergebnisse zeitlich veränderlicher Variablen (z.B. Einschätzungen) werden aber nur für Erstsemesterstudierende veranschaulicht.

Ergänzend zu den Fragebögen wurden mit den Studierenden in den Studiengängen Physik Plus und Lehramt Physik Interviews durchgeführt, um einen umfassenderen Einblick in die Wahrnehmungen und Wünsche der Studierenden zu erhalten. Im Studiengang Physik Plus nahmen in den Sommersemestern 2021 und 2022 jeweils 78% bzw. 88% der Studierenden an den Interviews teil. Die Interviews wurden als leitfadengestützte Gruppeninterviews geführt. Dabei interviewten sich die Studierenden anhand eines Leitfadens eigenständig, ohne dass eine zusätzliche interviewende Person anwesend war. Die Gruppengröße variierte zwischen zwei und fünf Teilnehmenden.

4.2. Eingangsvoraussetzungen von Physikstudierenden – Ergebnisse der Fragebogenerhebung

Die Fragebogenerhebung lehnt sich an etablierte Instrumente von Thiel (2008) und Freyer (2013) an. Der Fragebogen enthält Items zu den Angaben zur eigenen Person, wie Herkunft, Heimatort, familiäre Rahmenbedingungen oder eigene schulische Leistungen. Zudem werden Skalen z.B. zu Studienwahlmotiven, Selbsteinschätzungen und Studienvorstellungen abgebildet.

Einen der am meisten untersuchten Prädiktoren für Studienerfolg stellt die Abiturnote dar. Die Abiturergebnisse der Studierenden sind in Abbildung 4 dargestellt. Da der Studiengang Physik Plus erst mit dem WS 2020/21 gestartet ist, sind für das WS 2019/20 lediglich die Studiengänge Physik und das Lehramt Physik dargestellt. Es sind durchgängig signifikante Unterschiede zwischen den Studiengruppen beobachtbar. Die Studierenden im Studiengang Physik haben im statistischen Mittel eine bessere Abiturnote als die Studierenden im Studiengang Physik Plus.

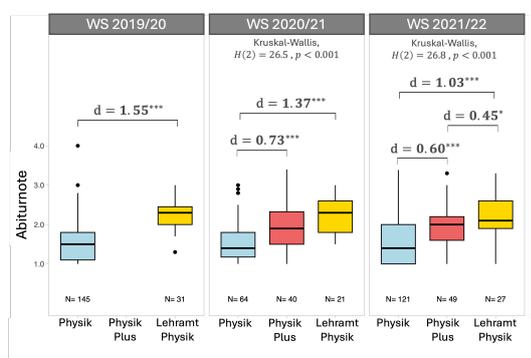


Abb. 4: Darstellung der Abiturnote der Studierenden für die entsprechenden Jahrgänge der Studiengänge Physik, Physik Plus und Lehramt Physik. Signifikante Unterschiede sind durch die Effektstärke d und das Signifikanzniveau gekennzeichnet. Quelle: Eigene Darstellung.

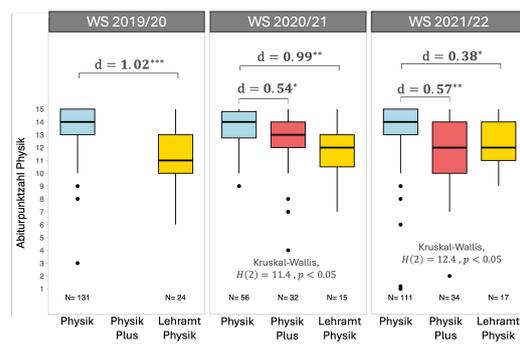


Abb. 5: Darstellung der Abiturpunktzahl für das Fach Physik der Studierende für die entsprechenden Jahrgänge der Studiengänge Physik, Physik Plus und Lehramt Physik. Signifikante Unterschiede sind durch die Effektstärke d und das Signifikanzniveau gekennzeichnet. Quelle: Eigene Darstellung.

Ein ähnliches Bild ergibt sich für die Abiturpunktzahl der Studierenden für das Fach Physik. Das Ergebnis ist in Abbildung 5 dargestellt.

Die Studierenden im Studiengang Physik Plus haben signifikant schlechtere Punktzahlen im Abitur im Fach Physik. Auffallend sind auch Ausreißer nach unten. Diese können auf eine Fehlinterpretation des Items hindeuten. Die Ausreißer beeinflussen die Signifikanz des Ergebnisses jedoch nicht in eine positive Richtung. Ähnliche Ergebnisse sind auch für die Abiturpunktzahl in Mathematik zu beobachten. Auch hier schneiden die Studierenden im Studiengang Physik Plus schlechter ab als Studierende des klassischen Physikstudiengangs. Auch eine gute Note in Mathematik gilt in naturwissenschaftlichen Studiengängen als Prädiktor für Studienerfolg.

Unterschiede zwischen den Studierenden zeigen sich auch bei weiteren bekannten Prädiktoren, wie z.B. dem Geschlecht oder dem Heimatort.

Eine weitere Skala, die untersucht wurde, befasste sich mit der eigenen Einschätzung der Lernschwierigkeiten.

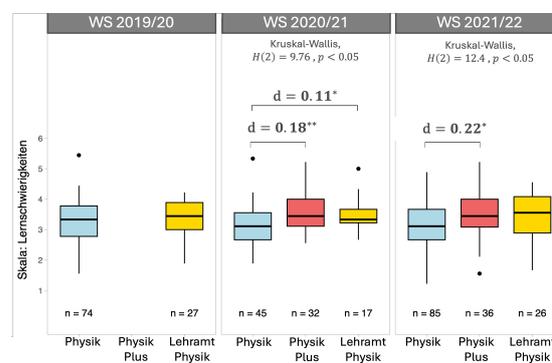


Abb. 6: Darstellung einer Skala zur Einschätzung der eigenen Lernschwierigkeit der Studierenden für die entsprechenden Jahrgänge der Studiengänge Physik, Physik Plus und Lehramt Physik. Eine hohe Bewertung bedeutet, dass die individuellen Lernschwierigkeiten höher eingeschätzt werden. Signifikante Unterschiede sind durch die Effektstärke d und das Signifikanzniveau gekennzeichnet. Quelle: Eigene Darstellung.

Die Ergebnisse dieser Skala sind in Abbildung 6 dargestellt. Ein höherer Wert bedeutet, dass die Studierenden ihre eigenen Lernschwierigkeiten höher eingeschätzt haben. Hier zeigt sich, dass die Studierenden im Studiengang Physik Plus ihre Lernschwierigkeiten signifikant höher einschätzten als Studierende im Studiengang Physik. Dies spricht für die Konzeption des Studiengangs Physik Plus.

Die Skalen zu Selbsteinschätzungen der Studierenden sind die physikbezogenen Fähigkeiten, experimentbezogenen Fähigkeiten und allgemeine (studienrelevante) Fähigkeiten. Hier zeigen sich trotz der statistisch signifikanten Unterschiede in den schulischen Leistungen keine Unterschiede zwischen den Studierenden der verschiedenen Studiengänge.

4.3. Wahrnehmungen von Studierenden zum Studiengang Physik Plus – Ergebnisse der Interviewerhebung

Um einen umfassenderen Einblick in die Wahrnehmungen der Studierenden des Studiengangs Physik Plus an der RWTH Aachen zu erhalten, führten diese Studierenden Interviews durch.

Die Interviews waren folgendermaßen gegliedert:

Teil I: Persönliche Daten

Teil II: Studienwahlmotive und Erwartungen

Teil III: Fragen zu Veranstaltungen im Studium

Teil IV: Allgemeine Studiensituation

Exemplarisch werden in diesem Abschnitt Ergebnisse zu den Studienwahlmotiven und Erwartungen der Studierenden vorgestellt.

Zu den Studienwahlmotiven wurden die Studierenden direkt befragt. Viele Studierende gaben an, dass sie ein großes physikalisches Interesse haben. Die Studierenden wurden auch befragt, warum sie sich speziell für den Studiengang Physik Plus entschieden haben. Die Antworten wurden kategorisiert und das Ergebnis ist in Abbildung 7 dargestellt. Dabei kann

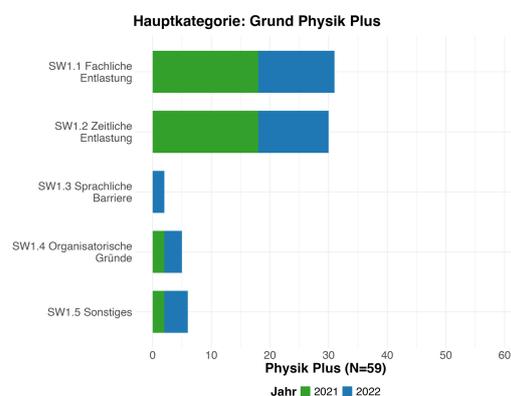


Abb. 7: Darstellung der Subkategorien zu dem Grund für die Wahl des Studiengangs Physik Plus. In grün sind die Ergebnisse für das SS 2021 und in blau die Ergebnisse für das SS 2022 dargestellt. Quelle: Eigene Darstellung.

die Antwort eines Studierenden auch mehreren Kategorien zugeordnet worden sein. Die Abbildung zeigt die zusammengefassten Ergebnisse aus dem SS 2021 und SS 2022.

Als Hauptgründe für die Wahl des Studiengangs Physik Plus lassen sich eine fachliche und eine zeitliche Entlastung nennen. Auch eine sprachliche Barriere wird von einigen Studierenden genannt. Durch den Studiengang Physik Plus trauen sich die Studierenden das Studium eher zu. Als organisatorische Gründe wurde genannt, dass die Studierenden die Einschreibefrist für den zulassungsbeschränkten Studiengang Physik verpasst hatten und sich daher in den Studiengang Physik Plus eingeschrieben haben.

5. Zusammenfassung

Mit dem Reformstudiengang Physik Plus hat die RWTH Aachen eine Möglichkeit geschaffen, dass die Studierenden in Physik einen Bachelorabschluss in acht statt der üblichen sechs Semester erwerben können. Die zusätzlichen Credit Points können zum Erwerb unverzichtbarer Basiskompetenzen und zu einer individuelleren Gestaltung des Studiums verwendet werden. Der Studiengang Physik Plus wurde in den Jahren 2020 bis 2024 im Durchschnitt von 56 Studierenden gewählt, wobei die Anfängerzahlen zwischen 40 und 75 variierten. Dies entsprach einem durchschnittlichen Anteil von etwa 27% (mit einer Variation zwischen 19% und 32%) der Physikstudierenden. Auffallend ist, dass die Frauenquote im Studiengang Physik Plus höher ist. Die Studierenden im Studiengang Physik Plus wählen diesen meist, um eine fachliche oder zeitliche Entlastung zu haben. Untersucht man die Eingangsvoraussetzungen von Physikstudierenden, kann festgestellt werden, dass die Studierenden im Studiengang Physik Plus signifikant schlechtere Eingangsvoraussetzungen (z.B. Abiturergebnisse) haben. Ihre eigene Zuordnung zum Studiengang Physik Plus kann helfen, die im statistischen Mittel schlechteren Eingangsvoraussetzungen durch Zusatzangebote und zeitliche Entzerrungen zumindest teilweise zu kompensieren.

6. Literatur

- Beck, K. (2017). Die neue Generation Studierender. In H. Schaeper & A. Wolter (Hrsg.), *Bildung und soziale Ungleichheit* (S. 211–229). Springer VS.
- Blömeke, S. (2008). Selbstkonzept und Studienerfolg. In E. Terhart, H. Bennewitz & M. Rothland (Hrsg.), *Handbuch der Forschung zum Lehrerberuf* (S. 703–716). Waxmann.
- de Lourdes Machado, M., Brites, R., Magalhães, A., & Sá, M. J. (2011). Satisfaction with higher education: A comparative view between students from different European countries. *Tertiary Education and Management*, 17(3), 241–257.
- Heublein, U. (2014). Studienabbruch in Deutschland: Ausmaß, Ursachen, Maßnahmen. DZHW.

- Heublein, U., Richter, J., Schmelzer, R., & Sommer, D. (2017). Die Ursachen des Studienabbruchs in Bachelor- und in traditionellen Studiengängen. DZHW.
- Hiemisch, A. (2005). Studienzufriedenheit: Eine Analyse mit besonderer Berücksichtigung von Studierenden in Fernstudiengängen. Logos Verlag.
- Isserstedt, W., & Middendorff, E. (2005). Studieren im Web 2.0: Lebenslagen, Orientierungen und Mediennutzung Studierender. HIS: Forum Hochschule.
- Nickel, S., & Scholz, R. (2011). Studienreform und ihre Folgen: Eine Zwischenbilanz. Beiträge zur Hochschulforschung, 33(3), 6–29.
- Robbins, S. B., Lauver, K., Le, H., Davis, D., Langley, R., & Carlstrom, A. (2004). Do psychosocial and study skill factors predict college outcomes? Psychological Bulletin, 130(2), 261–288.
- Schiefele, U., & Wild, K.-P. (2013). Motivation und Lernen mit digitalen Medien. In H. Mandl & H. F. Friedrich (Hrsg.), Handbuch Lernstrategien (S. 141–154). Beltz.
- Schmid, R. M., & Neuefeind, M. (2014). Brückenangebote in der Studieneingangsphase. Die Hochschule, 23(1), 77–94.
- Sorge, A., Neumann, J., & Haefner, P. (2016). Physikvorkenntnisse und Studienerfolg: Eine Analyse im ersten Studienjahr. Zeitschrift für Hochschulentwicklung, 11(3), 25–42.
- Sumfleth, E., & Leutner, D. (2020). Bedingungen erfolgreichen naturwissenschaftlichen Lernens. In A. Krapp & B. Weidenmann (Hrsg.), Pädagogische Psychologie (S. 789–810). Beltz.
- Trautwein, U., Lüdtke, O., Köller, O., & Baumert, J. (2007). Schülermerkmale als Prädiktoren des Studienabbruchs in den Naturwissenschaften. Zeitschrift für Entwicklungspsychologie und Pädagogische Psychologie, 39(3), 164–175.
- Trapmann, S., Hell, B., Weigand, S., & Schuler, H. (2007). Die Validität der Abiturnote bei der Vorhersage des Studienerfolgs. Zeitschrift für Pädagogische Psychologie, 21(1), 11–27.

Upho

- ein Gesellschaftsspiel zur Darstellung physikalischer Größen -

Nele Hack, Ramona Schauer-Bollig, Heidrun Heinke

I. Physikalische Institut IA, RWTH Aachen University, Otto-Blumenthal-Straße, 52074 Aachen
nele.hack@rwth-aachen.de

Kurzfassung

Beim Game-based Learning können basierend auf bestehenden Spielkonzepten neue Spiele entwickelt werden, um spielerisch Fachinhalte zu vermitteln. Es ist förderlich, wenn das grundlegende Regelwerk den meisten Schüler*innen bekannt ist. Sind darüber hinaus das Konzept und die Regeln des Spiels möglichst einfach gestaltet, können sie auch von denjenigen Schüler*innen schnell erarbeitet werden, denen das zugrundeliegende Gesellschaftsspiel nicht geläufig ist. Dieses Konzept lässt sich auch mit Themen aus dem Physikunterricht umsetzen. In diesem Unterricht soll unter anderem Kommunikation über physikalische Phänomene erlernt und physikalisches Wissen systematisiert werden. Eine wichtige Grundlage dafür ist die korrekte Darstellung physikalischer Größen. Deshalb wurde das Gesellschaftsspiel "Upho" entwickelt, das an das bekannte Spiel "Uno" angelehnt ist. Die Spieler*innen sollen damit üben, Größen, Formelzeichen, Einheiten und Formeln als solche zu erkennen und die zur selben physikalischen Größe gehörenden einander zuzuordnen. Das Spiel kann flexibel an verschiedene Themenbereiche angepasst werden, soll motivationsfördernd wirken, den Unterricht auflockern und ohne großen Material- oder Zeitaufwand eine Lerngelegenheit bieten. In ersten Erprobungen mit Schüler*innen wurde beobachtet, dass die teilnehmenden Schüler*innen gut mit dem Spiel zurechtkommen, Spaß haben und das Spielmaterial gut ankommt. Zudem wurden Selbsteinschätzungen der Schüler*innen erhoben, ob das Spiel einen Beitrag zu den Lernzielen leisten kann.

1. Einleitung

Im Physikunterricht sollen Schüler*innen ihr physikalisches Wissen systematisieren und physikalische Größen mathematisch beschreiben. [1] Zur Vermittlung dieser Inhalte kann das Konzept des Game-based Learnings genutzt werden. Im Folgenden wird ein Spiel beschrieben, das an das bekannte Spiel „Uno“ angelehnt und einfach ist, damit das Grundregelwerk den Schüler*innen geläufig ist oder schnell erlernt werden kann. Zu den Vorzügen des Spiels zählt, dass es an die verschiedenen Inhaltsfelder des Physikunterrichts der Mittelstufe anpassbar ist.

2. Hintergrund

Im Folgenden werden zunächst Lernspiele und Game-based Learning im Allgemeinen beschrieben. Anschließend wird auf einige Inhalte des Kernlehrplans für die gymnasiale Mittelstufe in Nordrhein-Westfalen eingegangen.

2.1. Lernspiele

Lernspiele verfolgen ein klar kommuniziertes und definiertes pädagogisches Ziel. Sie dienen dazu, spielerisch und implizit Lernfortschritte zu erreichen, Wissen aufzubauen sowie Fähigkeiten und Einsichten in Kulturtechniken zu üben. Solche Spiele nutzen, dass Menschen von Natur aus Spaß am Spielen haben. Dadurch soll extrinsische und intrinsische Motivation für reale Herausforderungen geschaffen werden. [2] Die Verwendung von Lernspielen im Unterricht bietet sich an, da sie den natürlichen Lerndrang wecken und die meisten Menschen Spaß am Spielen haben.

Die Spieler*innen werden dazu angeregt selbst aktiv zu sein und werden motiviert, sich aktiv mit den Inhalten auseinanderzusetzen. Mit Lernspielen können gezielt Wissen und geistige und motorische Fähigkeiten vermittelt werden. [3]

2.2. Game-based Learning

Im Gegensatz zur Gamification, die den Einsatz spielerischer Elemente in nicht-spielerischen Kontexten beschreibt, werden beim Game-Based Learning ganze Spiele verwendet. Durch Lernspiele oder auch ursprünglich nicht als Lernspiele ausgelegte Spiele, die für Lernzwecke verwendet werden, soll aktives, handlungs- und problemorientiertes Lernen gefördert werden. [4]

Das in diesem Beitrag vorgestellte Gesellschaftsspiel beruht auf einem bekannten Gesellschaftsspiel, ist für eine bestimmte Zielgruppe (Schüler*innen der Mittelstufe) gedacht und dient einer definierten Lernabsicht. Es handelt sich um ein vollständiges Spiel, somit nicht nur um einzelne Spielelemente, und dient der Vermittlung physikalischer Inhalte. Deshalb kann es dem Game-based Learning zugeordnet werden.

2.3. Bezug zum Kernlehrplan NRW

Im Folgenden werden einige Anforderungen an den Physikunterricht der Mittelstufe beschrieben, die der Kernlehrplan für die Sekundarstufe I für Gymnasien in Nordrhein-Westfalen stellt. [1]

Als einige grundsätzliche Ziele des Physikunterrichts werden genannt, die Sprache der

Naturwissenschaften und die Kommunikation über physikalische Phänomene und Gegebenheiten zu erlernen sowie das erworbene physikalische Wissen zu strukturieren und zu systematisieren. Im Kompetenzbereich „Erkenntnisgewinnung“ wird die „wichtige Rolle bei der präzisen Definition fachlicher Begriffe“ und der „Mathematische[n] Repräsentationen physikalischer Größen und Zusammenhänge“ [1] gesondert hervorgehoben. Eine korrekte Darstellung physikalischer Größen ermöglicht die Systematisierung physikalischen Wissens und die Kommunikation über Physik. Physikalische Größen „dienen der Exaktheit bei der Beschreibung physikalischer Vorgänge und bieten Ansätze zur Problemlösung, aber auch zur Herleitung neuer Hypothesen.“ [1]

Der Kernlehrplan für die gymnasiale Mittelstufe in Nordrhein-Westfalen sieht die Inhaltsfelder „Optische Instrumente“, „Sterne und Weltall“, „Bewegung, Kraft und Energie“, „Druck und Auftrieb“, „Elektrizität“, „Ionisierende Strahlung und Kernenergie“ und „Energieversorgung“ vor. [1] Das entwickelte Gesellschaftsspiel behandelt davon die Inhaltsfelder „Bewegung, Kraft und Energie“, „Druck und Auftrieb“, „Elektrizität“ und „Ionisierende Strahlung und Kernenergie“. Dabei werden die physikalischen Größen aus dem Inhaltsfeld „Bewegung, Kraft und Energie“ in die Themengebiete „Kraft und Arbeit“, „Bewegungen“ und „Energie“ unterteilt. Die drei zuletzt genannten Inhaltsfelder werden im Spiel behandelt.

3. Entwicklung des Spiels

Im Folgenden wird die Entwicklung des Spiels beschrieben. Dafür werden zunächst Lernziele und ein Spielkonzept als Basis ausgewählt und vorgestellt. Anschließend werden nötige Anpassungen des Spielkonzepts erläutert.

3.1. Auswahl der Lernziele und des Spielkonzepts

Vor dem Hintergrund der betrachteten Anforderungen des Kernlehrplans werden als Lernziele für das Spiel zum einen das Erkennen und Unterscheiden von Größen, Formelzeichen, Einheiten und Formeln und zum anderen das Erkennen von zueinander gehörenden Größen, Formelzeichen, Einheiten und Formeln festgelegt. Die verwendeten physikalischen Größen sollen je nach aktuellen und zuletzt im Unterricht behandelten Themen gewählt werden können. Dies soll ermöglicht werden, indem zwischen verschiedenen Kartendecks gewechselt werden kann.

Damit der Fokus auf dem Erreichen der genannten Lernziele liegt, wird als Basis zunächst ein bestehendes und verbreitetes Spielkonzept gesucht. Daraus ergibt sich der Vorteil, dass das Konzept und die Grundregeln den meisten Schüler*innen bereits bekannt sind und nur wenig Zeit investiert werden muss, um das Spiel zu erklären oder zu lernen. Außerdem wird dadurch das Risiko minimiert, dass einzelne Schüler*innen das Spiel nicht verstehen, sie dadurch nur eingeschränkt am Spiel teilnehmen können und die intendierten Lernziele nicht erreicht werden.

Wenn die Schüler*innen keine Verständnisprobleme bei den Spielregeln haben, können sie sich während des Spiels besser auf den Inhalt konzentrieren und ihn verinnerlichen.

Bei der Entwicklung des Spiels wurden die folgenden Anforderungen berücksichtigt:

- Da das Spiel im Unterricht nicht zu viel Zeit einnehmen sollte, darf die Spieldauer höchstens 20 Minuten betragen.
- Die Spielregeln sollen nicht zu komplex sein, damit die Schüler*innen, die das Spiel wider Erwarten nicht kennen, das Spiel schnell erlernen und auf den Stand ihrer Mitschüler*innen gebracht werden können.
- Es sollten nur geringe Kosten anfallen und wenig Material nötig sein, damit mehrere Ausführungen des Spiels vorhanden sein können, um eine Klasse zum Spielen in mehrere Gruppen aufteilen zu können.
- Wenn das Spiel zusätzlich mit vielen Personen spielbar ist, lässt sich der Materialaufwand nochmal reduzieren. Deswegen sollte das Spiel mit bis zu zehn Schüler*innen spielbar sein.
- Mithilfe des Spiels sollen Inhalte des Physikunterrichts vermittelt werden können.
- Zudem sollte das Spiel flexibel an die aktuellen Unterrichtsthemen angepasst werden können und mehrfach nutzbar sein.
- Das Spiel soll sich inhaltlich und vom Schwierigkeitsgrad her an die Mittelstufe richten.

Ein bekanntes Spielkonzept ist das von „Uno“. Es arbeitet mit Verknüpfungen, weshalb eine Passung zu den aufgestellten Lernzielen denkbar ist. Es hat einen relativ geringen Zeit-, Kosten- und Materialaufwand. Zudem ist es mehrfach nutzbar, für viele Spieler*innen ausgelegt und für die Mittelstufe altersgerecht. Auf Basis dieses Spielkonzepts wird ein modifiziertes Spielkonzept entwickelt, das eine Lerngelegenheit bieten soll und durch austauschbare Karten flexibel an verschiedene Unterrichtsthemen anpassbar ist.

3.2. Spielidee nach „Uno“

Das entwickelte Spiel basiert auf dem Konzept von „Uno“. Das Ziel dieses Spiels ist es, innerhalb mehrerer Runden 500 Punkte zu erzielen. In jeder Runde versuchen die Spieler*innen als Erstes alle Handkarten abzulegen. Die Person, die das schafft, erhält Punkte für die Karten, die die Mitspieler*innen noch auf der Hand haben. Die für „Uno“ verwendeten Karten haben die Zahlen 0 bis 9, jeweils in vier verschiedenen Farben in doppelter Ausführung. Eine Ausnahme ist die Karte mit der 0, die nur einmal pro Farbe vorkommt. Zudem gibt es die Sonderkarten: „Zieh Zwei“, „Retour“, „Farbenwahl“ und „Zieh Vier Farbenwahl“.

Spielkarten dürfen aufeinander gelegt werden, wenn sie die gleiche Farbe, die gleiche Zahl oder das gleiche Symbol haben. Einige Sonderkarten können auf

alle Karten gelegt werden. Zu Beginn des Spiels ziehen zunächst alle Spieler*innen eine Karte. Die Person, die die höchste Zahl zieht, muss mischen, für alle Spieler*innen sieben Handkarten austeilen und die oberste Karte des Nachziehstapels aufdecken. Die Person links neben der Person, die ausgeteilt hat, beginnt. Danach legen die Spieler*innen nacheinander Karten ab, bis jemand keine Karten mehr auf der Hand hat. Wer keine passende Karte hat oder legen will, muss eine Karte ziehen und kann diese sofort legen. Kann man nach dem Ziehen immer noch nicht legen, ist die nächste Person an der Reihe. Wenn eine Person nur noch eine Handkarte hat, muss sie sofort „Uno“ sagen. Vergisst sie das und wird sie von Mitspieler*innen darauf hingewiesen, muss sie zwei Karten ziehen [5].

Meist wird „Uno“ mit dem Ziel, einzelne Runden zu gewinnen anstatt 500 Punkte zu erreichen, gespielt. Dieses Ziel soll auch für das hier entwickelte Spiel verwendet werden. Dadurch wird das Kriterium kurzer Spieldauer besser erfüllt, weil nur eine Runde gespielt werden muss. Im hier vorgestellten Gesellschaftsspiel „Upho“ gibt es an Stelle der vier Farben die vier Kategorien „Größe“, „Formelzeichen“, „Einheit“ und „Formel“. Anstelle der Zahlen werden verschiedene physikalische Größen, wie „Spannung“, „Gewichtskraft“ oder „kinetische Energie“, verwendet. Diese kommen aus unterschiedlichen thematischen Kategorien. Es wurden einige Sonderkarten von „Uno“ mit ähnlichem Namen und ähnlicher Funktion übernommen und ein paar ergänzt. Im Spiel „Upho“ kann eine Karte abgelegt werden, wenn sie mit der obersten Karte auf dem Ablagestapel entweder in der Kategorie oder der beschriebenen physikalischen Größe übereinstimmt.

4. Vorstellung des Spiels „Upho“

Es wird im Folgenden das entwickelte Spiel „Upho“ beschrieben. Zunächst wird auf das entstandene Material eingegangen, dann auf den Spielverlauf und die Spielregeln. Im Anschluss wird erläutert, welche Maßnahmen bei der Entwicklung des Spiels getroffen wurden, um Binnendifferenzierung und verschiedene Schwierigkeitsstufen bei der Verwendung des Spiels im Unterricht zu ermöglichen.

4.1. Material

Für das Spiel werden die folgenden Materialien benötigt: die ausgewählten Spielkarten, eine Anleitung und eine Tabelle, in der alle Karten und die Art, wie diese aufeinander gelegt werden können, zu sehen sind. In Abbildung 1 sind beispielhaft die Karten zur Größe „Ladung“ gezeigt.

Auf jeder Karte ist die Aufschrift aus zwei verschiedenen Richtungen zu lesen. Größen, Formelzeichen, Einheiten und Formeln haben auf den Karten die folgende Darstellungen, an denen sie zu erkennen sind:

- Größe: Die Kartenaufschrift besteht aus einem Wort oder wenigen Wörtern.

- Formelzeichen: Auf den Karten stehen lediglich kursive Buchstaben, teilweise mit Index.
- Einheit: Diese Karten sind an ein bis wenige Buchstaben langen Kürzeln und darunter in Klammern stehenden ausgeschriebenen Wortformen zu erkennen.
- Formel: Zusätzlich zur entsprechenden Formel sind Erklärungen der in der Formel verwendeten Größen zu sehen.

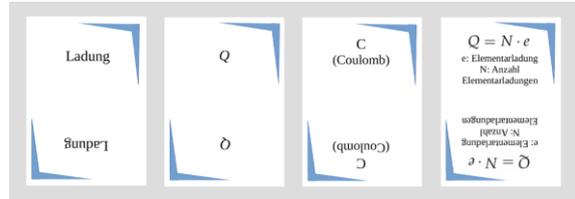


Abb. 1: Spielkarten zur Größe Ladung. Von links nach rechts die Karten „Größe“, „Formelzeichen“, „Einheit“ und „Formel“ für dieses Beispiel. Quelle: Eigene Darstellung.

Im Spiel gibt es außer den bereits vorgestellten Spielkarten mehrere Sonderkarten.

In der Anleitung sind der Ablauf des Spiels, die Spielregeln und die Funktionen der Karten erklärt. Außerdem wird in der Anleitung erläutert, was Größen, Formelzeichen, Einheiten und Formeln sind und wie man diese erkennt. In der Tabelle werden zudem alle im Spiel vorkommenden Größen kurz erklärt. Je nachdem, welche Themenbereiche im Unterricht bereits behandelt wurden oder aktuell behandelt werden, können entsprechende Spielkarten ausgewählt werden. Die Spielkarten sind abhängig von den verschiedenen Themenbereichen, denen sie zuzuordnen sind, verschiedenfarbig markiert. Dadurch können die Spielkarten, die verwendet werden sollen, anhand der Farbcodierung leicht erkannt werden. Es gibt die Spielkarten für drei verschiedene Schwierigkeitsstufen (siehe Abschnitt 4.3).

4.2. Spielverlauf und Regeln

Das entwickelte Spiel ist ausgelegt für drei bis zehn Spieler*innen und richtet sich an Schüler*innen der Mittelstufe. Ziel des Spiels ist es, als erste Spieler*in alle Handkarten abzulegen.

Zu Beginn des Spiels ziehen alle Spieler*innen eine Karte, bis eine Person eine Karte vom Typ Einheit zieht. Die Person, die diese Karte zieht, muss mischen, für alle Spieler*innen sieben Handkarten austeilen und eine Startkarte aufdecken. Werden die Karten „Zieh 2!“, „Richtungswechsel“, „Aussetzen!“ oder „Kategorienwahl“ als Startkarte aufgedeckt, wird so gespielt, als hätte die Person, die die Karten ausgeteilt hat, die Karte gelegt. Wird eine andere Sonderkarte zu Beginn aufgedeckt, wird eine neue Startkarte vom Nachziehstapel genommen. Es beginnt die im Uhrzeigersinn nächste Person.

Die Spieler*innen sind reihum am Zug und versuchen ihre Karten nacheinander auf den Ablagestapel zu legen. Eine Karte kann gelegt werden, wenn sie mit der obersten Karte auf dem Ablagestapel entweder mit

der Kategorie oder der beschriebenen physikalischen Größe übereinstimmt. Einige Sonderkarten dürfen auf alle Karten gelegt werden. Bei den Sonderkarten, bei denen dies nicht der Fall ist, steht, wie in Abbildung 2 zu sehen, auf der Karte, ob sie auf Größen, Formelzeichen, Einheiten oder Formeln gelegt werden dürfen.



Abb. 2: Beispiel für Sonderkarten. Darauf ist gekennzeichnet, auf welche Karten diese gelegt werden können. Quelle: Eigene Darstellung.

Wer nicht legen kann oder will, muss eine Karte ziehen und darf die gezogene Karte, aber keine Karte aus den Handkarten, legen, wenn die gezogene Karte passt. Wenn dies nicht der Fall ist, ist die nächste Person an der Reihe. Wenn eine Person keine Karten mehr hat, hat sie gewonnen und das Spiel ist vorbei. Auf die Regel aus dem Spiel „Uno“, dass Spieler*innen „Uno“ sagen müssen, wenn sie nur noch eine Handkarte haben, wird im Spiel „Upho“ verzichtet. Dadurch soll die Spielzeit kurz gehalten werden. Wenn die Regel verwendet würde, müssten Spieler*innen, die vergessen ihre letzte Handkarte anzusagen, Strafkarten ziehen, was das Spielende hinauszögern würde.

4.3. Binnendifferenzierung

Das Spiel ist darauf ausgelegt, dass die Schüler*innen lernen sollen Größen, Formelzeichen, Einheiten und Formeln zu erkennen und außerdem zu wissen, welche zueinander gehören. Das kann allerdings besonders, wenn das Spiel zum ersten Mal eingesetzt wird, schwer fallen. Eine Hilfestellung wird dadurch geboten, dass die Größen, Formelzeichen, Einheiten und Formeln auf den Spielkarten, wie in Abbildung 1 zu sehen, eine unterscheidbare Darstellung haben.

Außerdem wird während des Spiels eine Tabelle zur Verfügung gestellt, in der nachzulesen ist, welche Karten aufeinander gelegt werden können.

Das Spiel bietet verschiedene Möglichkeiten, die Schwierigkeit an die Lerngruppe oder die Lernsituation anzupassen. Dies kann zum Beispiel sinnvoll sein, wenn das Spiel zum ersten Mal, nur selten oder auch in heterogenen Lerngruppen eingesetzt wird. Zunächst kann dies durch die Variation der Anzahl an verwendeten Größen geschehen. Je mehr Größen verwendet werden, desto höher ist die Schwierigkeit. Zudem gibt es zwei vereinfachte Versionen der Spielkarten. In der ersten Version ist auf den Spielkarten anhand der grafischen Darstellung der Symbole in den Ecken zu erkennen, ob es sich um eine Größe, ein Formelzeichen, eine Einheit oder eine Formel handelt. Ein Beispiel für solche Spielkarten ist in der Abbildung 3 zu sehen.

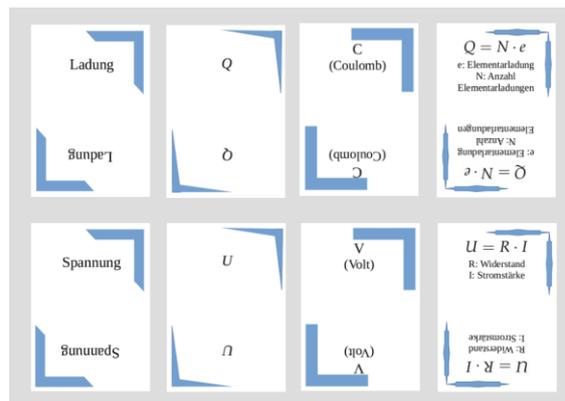


Abb. 3: Beispiel für Spielkarten in der vereinfachten Version 1, in der Größen, Formelzeichen, Einheiten und Formeln jeweils mit dem gleichen Symbol in zwei Ecken gekennzeichnet sind. Quelle: Eigene Darstellung.

In der Version 2 der vereinfachten Spielkarten sind die zu einer Größe gehörigen Karten zusätzlich in zwei Ecken mit gleichen Zahlen gekennzeichnet. Abbildung 4 zeigt Spielkarten dieser Schwierigkeitsstufe.

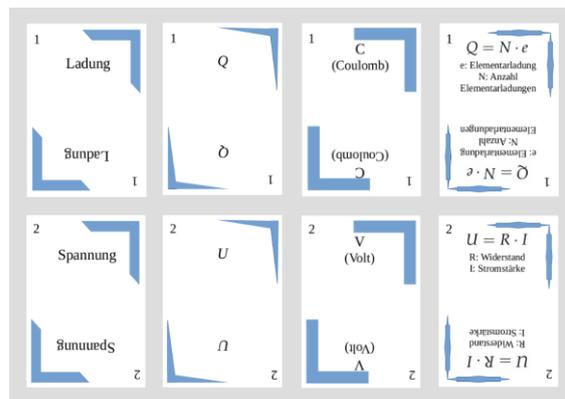


Abb. 4: Beispiel für Spielkarten in der vereinfachten Version 2, dass Größen, Formelzeichen, Einheiten und Formeln jeweils mit dem gleichen Symbol gekennzeichnet sind und dass die zu einer Größe gehörenden Spielkarten (Größe, Formelzeichen, Einheit und Formel) mit der selben Zahl gekennzeichnet sind. Quelle: Eigene Darstellung.

Durch diese Anpassungen wird das Spiel erleichtert. Wenn die Schüler*innen diese Versionen des Spiels mehrfach gespielt haben, kann zur ursprünglichen Variante ohne Vereinfachungen gewechselt werden.

Wenn die Spieler*innen bereits sehr erfahren sind und ihnen auch die Variante ohne Vereinfachung zu einfach erscheint, kann das Spiel erweitert werden. Eine Möglichkeit ist die Einführung von Karten mit Fragen, die beantwortet werden müssen, bevor Sonderkarten gelegt werden dürfen. Um die Spieldynamik zu erhalten, sollte so gespielt werden, dass eine Sonderkarte immer abgelegt werden darf, dann durch eine andere Person eine Frage gestellt wird und die Funktion der Sonderkarte nur eintritt, wenn die Frage korrekt beantwortet wurde. Auf den Karten mit den Fragen sollten auch die Antworten zu den Fragen angegeben werden, damit eine Person, die eine Frage vorliest, die gegebene Antwort korrekt bewerten

kann. Auf die Rückseiten der Karten sollte geschrieben werden, zu welchem Themengebiet sie gehören. Dann können die verwendeten Fragen passend zum aktuellen Unterrichtsthema ausgewählt werden. Es kann entweder zu jeder Sonderkarte eine beliebige Frage vorgelesen werden oder vorher geklärt werden, zu welcher Sonderkarte Fragen welchen Themengebiets zu beantworten sind. Eine weitere Möglichkeit ist es, Fragen mit verschiedenen Schwierigkeitsstufen zu verwenden und anzugeben, für welche Sonderkarten welche Fragen zu beantworten sind. Dadurch kann das Spiel interessanter werden, wenn die normale Version den Spieler*innen zu leicht wird, und die Themen können weiter vertieft werden. Um die Schüler*innen hier einzubinden, können die Fragen auch gegenseitig von den Schüler*innengruppen erstellt werden.

4.4. Weitere Nutzungsmöglichkeiten der Spielkarten

Die entwickelten Spielkarten können außer für das hier vorgestellte Spiel „Upho“ auch für andere Spiele und Anwendungen für den Unterricht als „Upho“ verwendet werden. Ohne die Sonderkarten können die Spielkarten zum Beispiel für ein Spiel angelehnt an das Konzept von „Halli Galli“ genutzt werden. Dabei müssen die Spieler*innen abwechselnd Karten aufdecken und die Karten, die bei „Upho“ aufeinander gelegt werden dürften, als zueinander passend erkennen und klingeln. Eine weitere Möglichkeit ist, die Karten zu acht bis zehn verschiedenen Größen in einfacher Ausführung für ein Quartett zu verwenden. Darüber hinaus kann mit den Karten zu sechs bis zehn physikalischen Größen in doppelter Ausführung ein Spiel angelehnt an „Qwirkle“ gespielt werden. Dabei müssen die Spieler*innen abwechselnd Karten in Zeilen oder Spalten aneinander legen, in denen jeweils nur die physikalische Größe gleich ist oder in denen alle Karten Größen, Formelzeichen, Einheiten oder Formeln sind, aber die physikalische Größe unterschiedlich ist. Mit diesen Alternativen können die gleichen Inhalte wie bei „Upho“ vermittelt und gleichzeitig Abwechslung geboten werden.

Außerdem können die Karten dazu verwendet werden, Übersichtstabellen zu legen. Dafür können Karten zum Beispiel abwechselnd in einer Gruppe so aneinander gelegt werden, dass Karten, die in einer Spalte liegen, zur gleichen physikalischen Größe gehören, und in den Zeilen alle Karten entweder Größen, Formelzeichen, Einheiten oder Formeln zeigen.

5. Erprobungen

Das Spiel wurde während der Entwicklung und nach deren Abschluss mehrfach mit Studierenden und Schüler*innen verschiedenen Alters getestet und evaluiert. Dies wird im Folgenden beschrieben.

5.1. Erprobungen mit Studierenden

Das Spiel wurde während der Entwicklung zur Untersuchung der Spieldynamik und der Funktionalität des

entwickelten Spielmaterials sieben Mal mit jeweils zwei bis acht Studierenden getestet. Daraus ergab sich, dass das Spiel mit drei oder mehr Spieler*innen gut funktioniert, wohingegen es mit zwei Spieler*innen eine schlechte Spieldynamik aufweist. Zwei Spieler*innen haben sehr oft beide keine passenden Karten und müssen über mehrere Runden nur nachziehen und können nicht legen. Dadurch dauert das Spiel einerseits sehr lange, da die Spieler*innen immer mehr Karten auf der Hand haben und nicht legen können, andererseits macht das Spiel den meisten Spieler*innen so wenig Spaß und es ist nur wenig Lerneffekt zu erwarten. Deshalb wurde die mögliche Anzahl an Spieler*innen auf drei bis zehn festgelegt.

Es wurde die Regel getestet, das Spiel erst zu beenden, wenn nur noch eine Person Karten auf der Hand hat. Dabei zeigte sich allerdings, dass dies die Spielzeit stark erhöht und die ersten Personen, die ihre Karten abgelegt haben, sehr lange unbeschäftigt sind. Um allen Spieler*innen über das ganze Spiel hinweg eine Lerngelegenheit zu bieten und die Spieldauer gering zu halten, wird die Regel, dass das Spiel beendet ist, wenn eine Person alle ihre Handkarten abgelegt hat, beibehalten.

Zudem wurde festgestellt, dass das Spiel auch ohne die Verwendung von Sonderkarten gespielt werden kann. Zu viele Sonderkarten wirken sich sogar schlecht auf den Spielfluss aus.

5.2. Erprobungen mit Schüler*innen

5.2.1. Testumgebung

Eine weitere Erprobung fand in einem Ferienprogramm statt, das sich an Schülerinnen mit MINT-Interesse nach der siebten und achten Klasse richtet. An der Erprobung nahmen 14 Schüler*innen teil. Die Schülerinnen wurden in zwei gleich große Testgruppen eingeteilt, mit denen die Erprobung jeweils ungefähr 40 Minuten dauerte.

Für die Schülerinnen, die sich zu einem großen Teil noch am Anfang der Mittelstufe befanden und von denen nicht bekannt war, welche Themenfelder sie im Unterricht bereits behandelt haben, wurden die Größen „Ladung“, „Spannung“, „Stromstärke“, „Widerstand“, „Federkraft“, „Gewichtskraft“, „Masse“, „Weg“, „Geschwindigkeit“ und „Beschleunigung“ verwendet. Es wird davon ausgegangen, dass diese eher bekannt sind als zum Beispiel Größen aus dem Themenbereich „Ionisierende Strahlung und Kernenergie“.

Es wurden zunächst die vereinfachten Spielkarten in der Version 2 verwendet. In einer zweiten Runde wurden die normalen Spielkarten verwendet.

Vor Spielbeginn wurden die Spielregeln und die Bedeutung und Darstellung von Größen, Formelzeichen, Einheiten und Formeln erläutert. Sowohl vor Beginn als auch während des Spiels wurden die Tabellen mit der Übersicht, welche Karten aufeinander gelegt werden können, und einer Erklärung der

Größen sowie eine Anleitung, die auch eine Erklärung zu Größen, Formelzeichen, Einheiten und Formeln enthält, zur Verfügung gestellt.

Nach dem Spielen wurden die Schüler*innen gebeten einen Feedbackbogen auszufüllen. Zunächst wurden Klasse und Schulform abgefragt. Weitere Fragen betrafen die Bewertung des Spiels allgemein (mit einer Bewertung auf einer 5-stufigen Skala) und den Vergleich der zwei gespielten Versionen des Spiels (mit der Bewertungsmöglichkeit für jeweils eine der beiden Versionen oder für beide Versionen). Außerdem wurden die Schüler*innen gebeten Verbesserungsvorschläge zu machen. Mit zwei Fragen A1 und A7 wurde der Spaß beim Spielen und ob sich die Probandinnen einen Einsatz im Unterricht vorstellen können überprüft. Mit weiteren vier Fragen A2, A3, A5 und A6 werden die Vorkenntnisse zum Spiel und die Funktionalität des Spielmaterials und Regelwerks betrachtet. Außerdem wurden die physikalischen Vorkenntnisse der Schüler*innen abgefragt.

Zusätzlich wurde die Frage, ob die Schülerinnen gut mit dem Spiel zurechtgekommen sind, getrennt für die beiden verwendeten Spielvarianten gestellt.

5.2.2. Erkenntnisse

Aus den Erprobungen liegen aus zwei Testgruppen Beobachtungsdaten vor. Es wurden zwölf Feedbackbögen vollständig und zwei fast vollständig ausgefüllt. Die Dauer der einzelnen Spielrunden wurde grob mitverfolgt. Sie betrug in allen Runden zwischen 15 und 20 Minuten, was im Rahmen der geplanten und erwarteten Spielzeit liegt. Auch die Spieldynamik war überzeugend. Bei den Fragen A1 bis A7, die nicht zwischen den beiden verwendeten Spielvarianten unterscheiden, werden die Antworten „trifft zu“ und „trifft eher zu“ als positive Bewertung, die Antworten „trifft nicht zu“ und „trifft eher nicht“ als negative Bewertung zusammengefasst. Zwölf Teilnehmende gaben bei Frage A1 an, Spaß am Spiel gehabt zu haben. Außerdem war das Spiel „Uno“ allen Schülerinnen bekannt. Es zeigte sich, dass die Schüler*innen die Spielregeln von „Uno“ kennen. 13 der 14 teilnehmenden Schülerinnen gaben auch an, die Spielregeln des Spiels „Upho“ verstanden zu haben (Frage A3) und die gute Verständlichkeit der Regeln wurde im Freitext hervorgehoben. Das deckt sich mit der Beobachtung, dass keine Fehler im Spielverlauf auftraten, die auf eine mangelnde Kenntnis der Spielregeln hindeuten.

5.3. Erprobungen im Physikunterricht einer neunten Klasse

5.3.1. Testumgebung

Das Spiel wurde im Physikunterricht einer neunten Klasse am Gymnasium mit 26 Schüler*innen getestet. Die Erprobung dauerte 45 Minuten. Zum Zeitpunkt der Erprobung wurde Elektrizitätslehre im Unterricht behandelt, davor Energie. Deshalb wurden Spielkarten zu den Themenbereichen Elektrizität und

Energie verwendet. Außerdem bekamen die Schüler*innen eine Anleitung und eine Übersichtstabelle mit den verwendeten Größen zur Verfügung gestellt.

Nach einer kurzen Einführung zum Spiel wurden die Schüler*innen gebeten, sich zu fünft oder zu sechst in Gruppen zusammenzufinden. Währenddessen wurde das Spielmaterial ausgeteilt und die Schüler*innen konnten sofort beginnen die Spielanleitung zu lesen und jederzeit Fragen stellen. Freiwillig konnten sie zunächst die vereinfachte Version 2 spielen. Danach sollten sie ein paar Runden des Spiels in der Version ohne Vereinfachung spielen und wurden im Anschluss gebeten einen Feedbackbogen auszufüllen.

Da die Schüler*innen die vereinfachte Version nur optional verwenden konnten, sollten die Schüler*innen die Versionen hier anders als bei der vorherigen Erprobung nicht vergleichen. Um ein detaillierteres Feedback zum Spielmaterial zu erhalten, wurden dazu Fragen ergänzt. Auch für eine Selbsteinschätzung der Schüler*innen zum Erreichen der Lernziele wurden Fragen ergänzt.

Die folgenden Fragen sollten die Schüler*innen mit „ja“ oder „nein“ beantworten.

- B1: Kennst du das Spiel „Uno“ und die wichtigsten Spielregeln?
- B2: Hast du die Übersichtstabelle verwendet?
- B3: Habt ihr zuerst eine Version mit Vereinfachung gespielt?
- B4: Ist in der Spielanleitung alles Nötige enthalten?

Die folgenden Aussagen waren auf einer Likert-Skala von 1 (trifft voll zu) bis 6 (trifft gar nicht zu) zu bewerten.

- B5: Die Übersichtstabelle ist verständlich.
- B6: Die Übersichtstabelle ist hilfreich.
- B7: Ich kannte die verwendeten physikalischen Größen.
- B8: Falls nicht alle Größen bekannt waren: Die unbekanntenen Größen habe ich in der Übersichtstabelle nachgeschaut.
- B9: Ich bin mit der Version mit Vereinfachung gut zurechtgekommen. (falls verwendet)
- B10: Ich bin mit der Version ohne Vereinfachung gut zurechtgekommen.
- B11: Die Spielkarten sind ansprechend gestaltet.
- B12: Die Spielanleitung ist verständlich.
- B13: Das Spiel hat mir geholfen, zwischen Größen, Formelzeichen, Einheiten und Formeln zu unterscheiden.
- B14: Das Spiel hat mir geholfen, zueinander passende Größen, Formelzeichen, Einheiten und Formeln einander zuzuordnen.
- B15: Das Spiel hat mir Spaß gemacht.

Außerdem wurden die Schüler*innen gebeten in Freitextfeldern anzugeben, was ihnen gut und was ihnen

nicht gut gefallen hat sowie Änderungsvorschläge oder weitere Anmerkungen zum Spiel aufzuschreiben. Mit den Aussagen B5, B6, B11 und B12 soll überprüft werden, wie das Spielmaterial von den Schüler*innen bewertet wird. Die Bewertungen der Aussagen B9 und B10 sollen bestätigen oder widerlegen, dass die Schüler*innen gut mit dem Spiel zurechtkommen. Die Aussagen B13 und B14 sollen erste Hinweise liefern, ob das entwickelte Spiel einen Beitrag zu den Lernzielen leisten kann. Aussage B15 dient der Überprüfung, ob das Spiel den Schüler*innen Spaß macht.

5.3.2. Erkenntnisse

Es wurden 25 Feedbackbögen vollständig und einer fast vollständig ausgefüllt. Alle Schüler*innen gaben an, das Spiel „Uno“ zu kennen, die Übersichtstabelle verwendet zu haben und, dass in der Spielanleitung alles Nötige enthalten sei (B1, B2, B4). Es starteten außerdem alle Schüler*innen sofort mit der Version ohne Vereinfachung. Deshalb konnten zur Version mit Vereinfachung keine Daten aufgenommen werden.

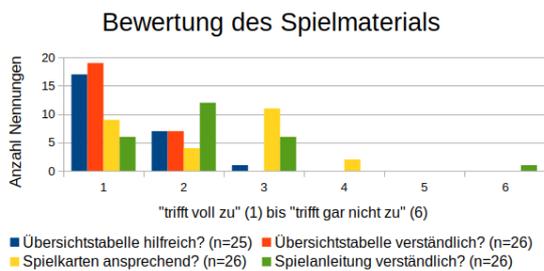


Abb. 5: Bewertungen des Spielmaterials durch die Schüler*innen. Quelle: Eigene Darstellung.

Das Spielmaterial wurde, wie das Diagramm in Abbildung 5 zeigt, überwiegend positiv bewertet. Lediglich die Gestaltung der Spielkarten schnitt etwas weniger gut ab. Das kann davon beeinflusst worden sein, dass einige Schüler*innen sich an den verschiedenen Farben der Karten zur Unterscheidung der Themengebiete störten, was auch mehrfach in den Freitextantworten genannt wurde.

In den Freitextfeldern wurde mehrfach genannt, dass das Spiel eine Lernmethode sei, die den Schüler*innen Spaß mache, eine gute Abwechslung zu anderen im Unterricht verwendeten Methoden und leicht zu verstehen sei. Als Verbesserungsvorschlag wurde genannt, dass die Spielregeln gemeinsam durchgegangen werden könnten.

Die meisten Schüler*innen gaben an, gut mit dem Spiel zurechtkommen zu sein und Spaß am Spiel gehabt zu haben (siehe Abbildung 6). Auch bei den Fragen zur Selbsteinschätzung des Beitrags zum Erreichen des Lernziels gaben die meisten Schüler*innen Bewertungen im positiven Bereich ab, was im Diagramm in Abbildung 7 zu sehen ist.

Angaben der Schüler*innen, ob sie gut mit dem Spiel zurechtkommen und Spaß haben

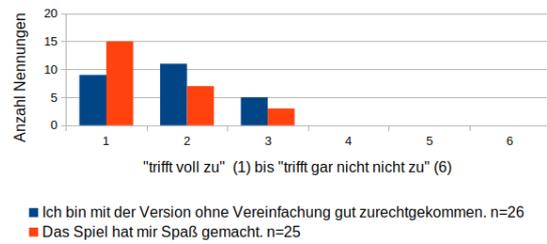


Abb. 6: Angaben der Schüler*innen, ob sie gut mit dem Spiel zurechtkommen sind und ob ihnen das Spiel Spaß gemacht hat. Quelle: Eigene Darstellung.

Einschätzung der Schüler*innen (n=26) zum Beitrag zum Erreichen der Lernziele

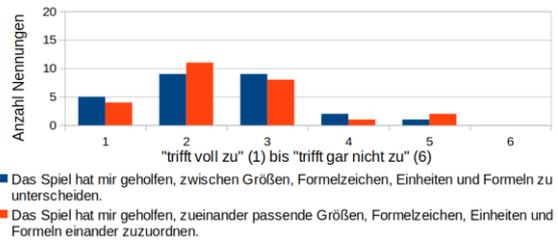


Abb. 7: Selbsteinschätzungen der Schüler*innen, ob mit dem Spiel ein Beitrag zum Erreichen der Lernziele geleistet wurde. Quelle: Eigene Darstellung.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das Spiel bei den meisten Schüler*innen gut ankommt. Um den Beitrag zu den Lernzielen noch weiter zu erhöhen, sollten die Spielregeln zu Beginn gemeinsam durchgegangen werden.

6. Zusammenfassung

Mit dem Spiel „Upho“ konnte ein Spiel entwickelt werden, das es Schüler*innen ermöglicht, spielerisch das Erkennen, Unterscheiden und Zuordnen von Größen, Formelzeichen, Einheiten und Formeln aus verschiedenen Themengebieten der Mittelstufe zu üben und zu vertiefen.

In ersten Erprobungen des entwickelten Spiels zeigte sich, dass Schüler*innen meist gut zurechtkommen, Spaß am Spiel haben, das Spielmaterial überwiegend positiv bewerten und zudem beurteilen, dass das Spiel einen Beitrag zum Erreichen der Lernziele leisten kann. Außerdem kannten alle teilnehmenden Schüler*innen das Spiel „Uno“ und viele gaben an, dass das getestete Spiel leicht zu erlernen und eine spaßige Methode zum Lernen sei. Dies bestätigt den gewählten Ansatz, dass ein bekanntes Spielkonzept als Grundlage verwendet wurde und das darauf basierende Spiel dadurch sowie durch einfache Regeln leicht zu erlernen ist.

Es zeigt sich, dass mit Spielen wie „Upho“, die sich des Konzepts des Game-based Learnings bedienen, spielerisch physikalische Inhalte behandelt werden können.

7. Ausblick

Im Rahmen einer längeren Studie mit Wissensüberprüfung vor und nach mehrmaligem Spielen des Spiels kann der Lerneffekt überprüft werden. Des Weiteren könnten die beschriebenen Fragekarten zur Differenzierung entwickelt werden. Außerdem könnten Karten zu weiteren Themengebieten des Physikunterrichts, auch für die Oberstufe, entwickelt werden und der Einsatz des Spiels zum Wiederholen der Inhalte der Mittelstufe zu Beginn der Oberstufe ausführlich getestet werden.

8. Literatur

- [1] Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen (2019). Kernlehrplan für die Sekundarstufe I, S. 14-19 Gymnasium in Nordrhein-Westfalen – Physik.
- [2] Institut für Ludologie (2021). Spiel-Definitionen - Spiele - so zahlreich und vielfältig. URL: <https://www.ludologie.de/spiel-forschung/brettspiel-klassifikationen/> (Stand 7/2024)
- [3] Cornelsen Verlag (2024). Lernspiele – Spielerisch lernen mit Cornelsen. URL: <https://www.cornelsen.de/empfehlungen/lernspiele> (Stand 5/2025)
- [4] Fischer, S. und A. Reichmuth (2020). Gamification - Spielend lernen. Bern: hep Verlag AG, S. 9-11
- [5] Uno - das Kartenspiel (2024). Uno Spielregeln. URL: <https://www.uno-kartenspiel.de/spielregeln/> (Stand 5/2025)

Was macht das K in MINKT?

- Ein Review zu Ansätzen von MINKT / STEAM in der naturwissenschaftlichen Bildung -

Nathalie Wolke, Susanne Heinicke

Universität Münster, Wilhelm-Klemm-Str.10, 48149 Münster
nathalie.wolke@uni-muenster.de

Kurzfassung

Der vorliegende Beitrag untersucht die Rolle von Kreativität und Kunst im Rahmen des MINKT-/STEAM-Unterrichtsansatzes auf Basis eines systematischen Reviews internationaler empirischer Studien (n = 22). Ziel ist es, die verschiedenen Verständnisse von K (Kunst oder Kreativität) im deutschsprachigen Begriff MINKT und die entsprechenden Konzepte im internationalen STEAM zu analysieren. Die Studien wurden in Anlehnung an PRISMA-Empfehlungen für systematische Reviews aus Scopus und Web of Science identifiziert und auf Eignung geprüft. Dabei konnten keine geeigneten deutschsprachigen Veröffentlichungen gefunden werden, sodass sich die Analyse rein auf Studien zu STEAM berufen muss. Die Ergebnisse der Analyse zeigen, dass eine Förderung von Kreativität in den Studien als zentrale Wirkung von STEAM-Interventionen gilt, wobei diese jedoch unterschiedlich definiert wird. Dabei besteht außerdem keine einheitliche Auffassung darüber, ob das A in STEAM für bildende und darstellende Kunst, Gesellschaftswissenschaften oder auch jegliche kreativen Tätigkeiten steht. Die Diskussion beleuchtet theoretische, didaktische und empirische Implikationen für die fächerübergreifende Lehre in den Naturwissenschaften und der Kunst.

1. Einleitung

Der zunehmende Ruf nach interdisziplinärem Lernen und der Förderung sogenannter 21st Century Skills wie Kreativität, Kommunikation, Kollaboration und kritischem Denken, die auf eine von immer neuen Herausforderungen geprägte Zukunft vorbereiten, hat in den letzten Jahren unter anderem zu verstärkten Überlegungen rund um die Umsetzung fächerübergreifender Projekte geführt (Bertelsmann Stiftung et al., 2019; Krüger & Chiappe, 2021). STEAM, als gemeinsamer projektorientierter Unterricht von STEM (Science, Technology, Engineering, Mathematics) und A (Arts) (Bush & Cook, 2019) ist ein Beispiel für diesen Trend (Irwanto & Ananda, 2024; Krüger & Chiappe, 2021).

STEAM verfolgt das Ziel, kreative und analytische Kompetenzen gleichermaßen zu fördern und fokussiert dabei insbesondere auf die Kreativität (Perignat & Katz-Buonincontro, 2018; Aguilera & Ortiz-Revilla, 2021). Diese gilt hierbei als eine Schlüsselkompetenz für Problemlösung, Innovation und gesellschaftliche Teilhabe im 21. Jahrhundert (Bertelsmann Stiftung et al., 2019) und soll durch den interdisziplinären STEAM-Ansatz besonders unterstützt werden (Colucci-Gray et al., 2017). Die Einbindung künstlerischer Elemente soll dabei helfen, Lernprozesse affektiver, kontextualisierter und schülerzentrierter zu gestalten (Perignat & Katz-Buonincontro, 2018; Irwanto & Ananda, 2024; Deutsche Telekom Stiftung, 2024). Außerdem soll der Ansatz in seiner Interdisziplinarität Parallelen zu realen Herausforderungen wie Nutzung von KI und Umgang mit dem Klimawandel aufzeigen, die ebenfalls interdisziplinärer

Natur sind, und so vernetzte Problemlösung und Innovation unterstützen (Aguilera & Ortiz-Revilla, 2021).

Gerade die Naturwissenschaften können von dieser Öffnung profitieren, da klassische Unterrichtsformen häufig als lebensfern und abstrakt erlebt werden, was sich in rückläufigem Interesse und sinkenden Studierendenzahlen widerspiegelt (Düchs & Runge, 2023; Willems, 2007). Dieser Trend war auch einer der Gründe für die Entwicklung des STEAM-Ansatzes, der neben den Naturwissenschaften das Interesse an allen STEM-Fächern fördern soll (Perignat & Katz-Buonincontro, 2018). Aber auch der Kunstunterricht kann durch technikgestützte oder naturwissenschaftliche Zugänge an Interesse gewinnen, indem zum Teil starre Praktiken wie das „Abzeichnen“ Alternativen bekommen und er mehr Lernenden – jenseits klassischen Zeichnens – ästhetisch-gestalterische Erfahrungen ermöglicht (Berner & Glaser-Henzer, 2022). Auch zentrale Aspekte der künstlerischen Rezeption, wie die menschliche Wahrnehmung (Buschkühle, 2017), können so vor dem Hintergrund naturwissenschaftlicher Entdeckungen und Instrumente reflektiert werden.

Während in den USA und anderen internationalen Kontexten STEAM zunehmend implementiert wird (Perignat & Katz-Buonincontro, 2018), bleibt die Integration in deutschen Lehrplänen fragmentiert. Im deutschsprachigen Raum existiert mit dem Begriff MINKT eine annähernde Übersetzung, die das englische A durch das deutsche K ersetzt – wobei dieses sowohl für Kunst als auch für Kreativität stehen kann (Fthenakis, 2016; Mintuitiv, 2021; Haft, 2023). Diese Doppelbedeutung führt zu begrifflicher Unschärfe,

insbesondere wenn es darum geht, empirische Forschungsergebnisse zu interpretieren oder fächerübergreifend didaktische Modelle zu entwickeln. So ist z.B. eine häufige Überzeugung (35% befragter Lehrkräfte), Kreativität sei ausschließlich gleichbedeutend mit künstlerischem Tun wie Zeichnen oder Malerei – was sowohl wichtige Dimensionen der Kreativität als auch des Fachs Kunst vernachlässigt (Aljuhaiman & Mowrer-Reynolds, 2005; Newton & Beverton, 2012).

Ziel dieses Beitrags ist es daher, auf Basis eines systematischen Literaturreviews aktueller empirischer Studien zentrale Erkenntnisse zur theoretischen Verankerung des A bzw. K in STEAM/MINKT zusammenzutragen und eine Übersicht über bisherige Forschungsergebnisse zur Wirkung von STEAM/MINKT auf die Kreativität zu geben.

2. Ein kurzer Einblick in die Kreativitätsforschung

Um den Zusammenhang von MINKT und Kreativität zu untersuchen, ist es wichtig, einen kurzen Einblick in den Forschungsdiskurs zur Kreativität zu geben.

Für Kreativität gilt gemäß einer (vergleichsweise) konsensuellen Standarddefinition (Colin, 2017) „creativity requires both originality (novelty) and effectiveness (usefulness)“ (Runco & Jaeger, 2012)“. Daneben existieren viele weitere Definitionen, mit Blick auf den naturwissenschaftlichen Unterricht sei hier noch die häufig zitierte Definition von Poincaré aus dem Feld der Mathematik genannt: „Creativity may be summed up as the ability to combine already existing elements into new combinations that are useful“ (Poincaré, 1908).

Bislang liegt noch kein allgemein akzeptiertes Konstrukt von Kreativität vor (Urban, 2004). Die Kreativitätsforschung ist ein eher junges Forschungsfeld, das seit den 1950er Jahren stark von J.P. Guilford geprägt wurde. Sein Kreativitätsmodell steht bis heute im Diskurs und ist eines der wichtigsten akademischen Modelle der Kreativität (Urban, 2004). Es fasst Kreativität als sequenzielles Aufeinanderfolgen von Phasen konvergenter und divergenter Denkens auf (Guilford, 1956). Divergentes Denken ist die Fähigkeit, verschiedene mögliche Antworten oder unterschiedliche Lösungen für eine Frage zu finden. Im Gegensatz zum divergenten Denken ist konvergentes Denken eine Form des Denkens, die auftritt, wenn Individuen vorhandenes Wissen oder traditionelle Methoden nutzen, um die gegebenen Informationen zu analysieren und die beste Antwort zu erhalten (Guilford, 1956).

Neben dem Modell von Guilford existieren weitere Modelle, die Kreativität als einen Prozess auffassen, z.B. das frühe stufenbasierte Modell von Wallas (1926). Das Modell teilt den kreativen Prozess in vier Phasen von der aktiven Auseinandersetzung mit der Idee über die unbewussten Phasen der Inkubation und Illumination (den Moment der Idee) bis hin zur

bewussten Verifikation der Idee und weist somit darauf hin, dass nicht alle Prozessschritte bewusst ablaufen müssen.

Eine andere Herangehensweise als Prozessmodelle wählen die Systemmodelle von Kreativität, z.B. von Csikzentmihalyi (1999), die Kreativität als das Ergebnis von Wechselwirkungen zwischen einem System aus drei Elementen sehen: der Kultur, einem Individuum, das eine Neuheit in ein Gebiet einbringt, und Experten, die die Innovation erkennen und bestätigen. Auch der Vier-Ps-Rahmen (Rhodes, 1961), der die Elemente der Kreativitätsforschung als „person“, „product“, „process“ und „press“ strukturiert, denkt mit „press“ das Gebiet und seine Experten im Zustandekommen von Kreativität mit. Zu den Kreativitätsmodellen gehören auch Komponentenmodelle wie das von Urban (2004), das Bedingungen für das Zustandekommen kreativer Prozesse in individueller, nah-umwelt-bezogener und gesellschaftlich/historisch-globaler Dimension einteilt. Darüber hinaus ist auch die Vier-C-Theorie (Kaufmann & Beghetto, 2009), die verschiedene Arten von Kreativität von „Little C“ (kleine alltägliche Ideen/Lösungen) bis „Big C“ (gesellschaftlich relevante Ideen/Lösungen) klassifiziert, zu erwähnen. Die Vielfalt der Modelle, in die hier nur ein kleiner Einblick gegeben wurde, verdeutlicht die Fragmentierung des Bereichs.

Zur Messung von Kreativität wurden vor allem von amerikanischen Forschenden populäre Instrumente entwickelt und weltweit zur empirischen Forschung eingesetzt (Urban, 2004). Zu diesen gehört der „Torrance Test of Creative Thinking (TTCT)“. Bei diesem Test werden die Prüflinge aufgefordert, zu zeichnen und ihre Zeichnungen zu betiteln (figuraler Test) oder Fragen, Gründe, Konsequenzen einer Aussage oder verschiedene Verwendungsmöglichkeiten für Objekte aufzuschreiben (verbaler Test). Die Zeichnungen werden anhand von fünf mentalen Charakteristika („fluency“, „resistance to premature closure“, „elaboration“, „abstractness of titles“, and „originality“), die schriftlichen Antworten anhand von drei Charakteristika („fluency“, „flexibility“, and „originality“) bewertet. Figurativer und verbaler Test können einzeln oder gemeinsam eingesetzt werden (Torrance, 1981 (a);(b)).

Auch der „Alternative uses test“ von Guilford et al. (1978) fragt konkret nach möglichst vielen Verwendungen für ein Objekt, z.B. einen Ziegelstein, die in einer bestimmten Zeit aufgelistet werden sollen. Der Test fokussiert so insbesondere auf die Fähigkeit zu divergentem Denken. Andere Forschende kritisierten, dass Tests mit diesem Fokus zu viele Aspekte der Kreativität ignorieren und entwickelten eigene Instrumente. Z.B. Urbans TSD-Z (2004) gibt Kästchen, die wenige Fragmente beinhalten, vor, die weitergezeichnet werden sollen und bewertet die Kreativität der Zeichnung anhand von 14 Kategorien, in denen neben dem Zeitfaktor auch Begrenzungsüberschreitungen des Kästchens auf dem Blatt und vier Dimensionen der „Unkonventionalität“ beachtet werden. Neben

diesen Testinstrumenten und ihren Weiterentwicklungen existieren mannigfaltige quantitative und qualitative Erhebungsinstrumente für Kreativität, deren Vielfalt auch bei der Betrachtung der Erhebungsinstrumente der Studien in diesem Review deutlich wird (Kap. 5.4).

3. Forschungsfragen

Um zu analysieren, wie in aktueller empirischer Forschung Forschungsergebnisse zur Förderung von Kreativität durch MINKT/STEAM und das theoretische Verständnis von Kreativität und Kunst/Arts mit MINT/STEM zusammenhängen, verfolgt der systematische Review die folgenden vier Forschungsfragen.

- Wie wird das K in MINKT / das A in STEAM definiert?
- Welche Argumente für MINKT/STEAM werden genannt?
- Wie wird Kreativität konzeptualisiert? (Definitionen, Modelle)
- Welche empirischen Effekte auf Kreativität werden berichtet? (Ergebnisse, Erhebungsinstrumente)

4. Methodik

Zur Identifikation relevanter Studien wurde eine systematische Literatursuche nach den PRISMA-Richtlinien durchgeführt (Ziegler et al., 2011). Die Recherche erfolgte kriteriengeleitet in den Datenbanken Scopus und Web of Science mit Hilfe von Suchstrings, die systematische Literatursuchen ermöglichen (s. Kap.9).

Als Suchworte wurden „creativ*“, „STEAM“ und „kreativ*“, „MINKT“ verwendet, da der Fokus insbesondere auf den Zusammenhängen zwischen Kunst und Kreativität innerhalb von MINKT bzw. STEAM lag. Berücksichtigt wurden Studien im Zeitraum von 2003–2024, da der STEAM-Ansatz erstens selbst noch jung ist und zweitens insbesondere in den letzten Jahren ein zunehmender Trend zu Veröffentlichungen zum Thema erkennbar ist (Irwanto & Ananda, 2024). Hinsichtlich des Alters der Lernenden wurden Studien ausgewählt, bei denen Lernende im Primar- und Sekundarbereich oder als Studierende an Universitäten und Colleges etc. verortet sind. Es wurden sowohl Studien in formalen Bildungssettings als auch an außerschulischen Lernorten berücksichtigt. Studien, die z.B. mit Mitarbeitenden eines Industrieunternehmens durchgeführt wurden, wurden ausgeschlossen. Bei der Erstellung der Suchstrings wurden zudem weitere Ausschlusskriterien einbezogen, die dazu dienten, möglichst viele Studien, die nicht den beschriebenen Rahmenbedingungen genügen, bereits automatisch auszuschließen

Nach Festlegung der Suchstrings wurden die Suchergebnisse der beiden Datenbanken Scopus und Web of Science zunächst auf Duplikate geprüft

(Identifikation). In diese Gesamtliste wurden sämtliche Titel und Abstracts auf Passung zu den genannten Kriterien geprüft, sodass bereits zahlreiche Studien ausgeschlossen wurden (Vorauswahl). Für die jeweils übrigen Studien erfolgte eine weitere Prüfung auf Grundlage der Volltexte (Eignung). Sowohl bei der Vorauswahl als auch bei der Eignungsprüfung wurden Studien ausgeschlossen, die sich z.B. nur mit MINT-Fächern (STEM) oder nur Kunstunterricht befassten oder in der Art der Publikation keine Studien darstellen, sondern als Theoriebeitrag, Review, Meta-Analyse etc. zu charakterisieren sind.

Insgesamt wurden so 621 Treffer identifiziert. Nach der Entfernung von Duplikaten verblieben 522 Beiträge. Im Rahmen der Eignungsprüfung anhand von Abstracts und Titeln wurden 455 ausgeschlossen. Die kombinierte Suche nach STEAM/MINKT und kreativ*/kreativ* (s. Kap.9) ergab nur sechs Treffer mehr als eine vergleichende Suche nur nach STEAM und kreativ*, und keiner der zusätzlichen Treffer war gemäß Titel und Abstract für den Review thematisch geeignet. Weitere 45 Studien konnten aufgrund inhaltlicher Unschärfen nach einer Volltextprüfung nicht in die finale Analyse einbezogen werden. So verblieben 22 Studien, die einer detaillierten Inhaltsanalyse unterzogen wurden.

5. Ergebnisse

Die Ergebnisse werden nun strukturiert anhand der Forschungsfragen erläutert, wobei zuerst ein Überblick über die Charakteristika der 22 berücksichtigten Studien gegeben wird.

5.1 Überblick über die Studien

Bei der Herkunft der Studien sowie bei der Verteilung von Methodiken, Erscheinungsjahren und untersuchten Stichproben sowie beim fachlichen Hintergrund der Publikationen zeigt sich je eine Tendenz:

- Knapp die Hälfte der Studien kommt aus Asien.
- Die quantitative Methodik zur Erfassung der Kreativität überwiegt.
- Der Großteil der Studien wurde 2021-2023 veröffentlicht, die meisten davon 2023.
- Etwas mehr als die Hälfte der Studien fokussierten auf Lernende im Alter der deutschen SEK I, aber auch Grundschule, Hochschule und SEK II waren vertreten.
- Nur zwei der 22 Studien sind von Autoren mit künstlerischen bzw. kunstdidaktischem Hintergrund verfasst (9; 19).

5.2 Verständnis des A/K in STEAM/MINKT

Da keine deutschsprachigen Studien identifiziert werden konnten, beziehen sich die Ergebnisse, die Abb. 1 zu finden sind, auf das A in STEAM.

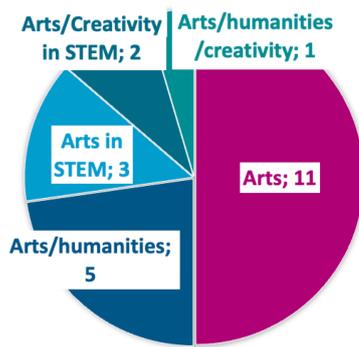


Abb.1: Übersicht über die Definitionen des A in STEAM innerhalb der 22 Studien (eigene Darstellung)

In der Mehrzahl der Studien wurde das A mit Kunst bzw. klassischen künstlerischen Disziplinen gleichgesetzt. Einige Arbeiten interpretierten das A hingegen abstrakter als Synonym für künstlerische, kreative Ausdrucksformen in STEM-Fächern (5; 18) oder als „das Künstlerische“ in STEM-Fächern (7; 16), wie z.B. Formate von Wissenschaftskommunikation. Einige Studien zählen zu „Arts“ auch „Humanities“ (10, 11, 12, 14; 22) und/oder „creativity“ (8) hinzu.

Darüber hinaus betonten einige Studien eine Verwandtschaft des STEAM-Ansatzes mit anderen Unterrichtsansätzen. Insbesondere dem

- Problem-Based-Learning (4; 10; 13; 14; 15; 17; 21) und
- Design (4; 13; 14),
- der Maker culture (19) und dem
- 6E-learning (13) sowie
- CAIM (10).

5.3 Potentiale von STEAM

Die untersuchten Studien nennen eine Vielzahl von Argumenten für STEAM. Dabei liegen diese Potentiale häufig in der Förderung bestimmter Fähigkeiten wie der Kreativität, aber auch auf der Ebene von Interesse, Motivation und dem Umgang mit Emotionen. Konkret wurden folgende Potentiale genannt:

- Kreativität:** Das Potential von STEAM zur Förderung von Kreativität wird von allen Studien genannt, wobei sich die Studien aus künstlerischem/kunstdidaktischem Kontext insbesondere auf kollaborative Kreativität beziehen (9; 19) oder auch die verbesserte Reflexion des eigenen kreativen Prozesses durch STEAM betonen (9).
- Attraktivität von STEM:** Das zweithäufigste Argument (19 Studien) ist die Steigerung der Attraktivität der STEM-Fächer anhand der Möglichkeit, eine heterogenere Gruppe Lernender durch die Einbindung von „Arts“ anzusprechen. Einige Studien beziehen sich auf Motivation (5; 11; 15) und Interesse (3; 10.; 14; 16) in den (STEM-) Fächern und wenige gehen sogar so weit zu sagen, dass STEAM dem „schlechten Ruf“ der STEM-Fächer entgegenwirkt (5; 11).

- Fachübergreifende Skills:** Fähigkeiten, die über die Fachgrenzen hinausgehen, werden von 15 Studien genannt. Der Begriff der 21st century Skills wird dabei explizit in vier Studien erwähnt (15; 16; 17; 19), und zwei beziehen sich auf eine Förderung von Scientific Literacy (10; 18). Genannt werden aber auch andere übergreifende Potentiale wie die Förderung kognitiver Entwicklung durch Interdisziplinarität (14).
- STEM-Skills:** Zehn Studien sprechen STEAM Potential zur Verbesserung von Fähigkeiten in STEM-Fächern zu, z.B. von naturwissenschaftlichen und mathematischen Fähigkeiten (12; 17; 18) oder ein verbessertes Verständnis für Technologie (10; 18)
- Emotionale Sensitivität und Regulation:** Neun Studien beziehen emotionale Aspekte in die Potentiale von STEAM ein. So sprechen zwei Studien STEAM ein Potential für die Förderung emotionaler Sensitivität zu (4; 14). Der emotionale Impact der „Arts“-Anteile im Unterricht ließe sich auf die Naturwissenschaften übertragen, wodurch gleichzeitig kognitive als auch affektive Lernprozesse angestoßen werden (5; 6; 16).
- Verbindung zur Realität:** Sieben Studien betonen die Bezüge von STEAM zu realen Problemen (6; 10; 11; 14; 16; 18; 22). Hervorgehoben wird z.B. insbesondere, dass die Einbeziehung der Künste in STEAM den interdisziplinären Charakter von realem Problemlösen, realem Design und realer Innovation verdeutlicht, welcher neben den Natur- und Ingenieurwissenschaften auch die Geistes- und Sozialwissenschaften sowie die Künste umfasst (22).
- Art skills:** Vier Studien betonen die Potentiale von STEAM für die Förderung künstlerischer Fähigkeiten, wobei eine (17) insbesondere „craft art skills“ hervorhebt und die drei anderen Studien auf globaler Ebene das Potential von STEAM betonen, Fähigkeiten in allen fünf Fachrichtungen zu fördern (3; 10; 14).

5.4 Kreativitätsdefinitionen und -modelle

Die genannten Definitionen sind hier anhand der wörtlichen Definitionen paraphrasiert und ähnliche Definitionen so zu einer zusammengefasst.

Die an die Definition von Runco & Jäger (2012) angelehnte paraphrasierte Definition „Creativity is creating something that is novel, original and useful“ wird von elf Studien genutzt (1; 2; 3; 4; 5; 6; 8; 9; 14; 19; 22). Am zweithäufigsten ist eine Definition, die soziokulturelle Prozesse mitdenkt, ähnlich zu „Creativity is a complex socio-cultural process that requires great openness from both the individual and its social environment“ (4; 5; 6; 9; 12; 19). Eine dritte Herangehensweise fokussiert das Problemlösen analog zu „Creativity is a complex process of identifying and solving problems“ (5; 12; 14; 19; 21).

Weitere Definitionen beziehen sich auf die Beschreibung messbarer Elemente von Kreativität wie „ACT“ und „FLOW“ (5; 6) oder die Definition messbarer Elemente von Torrance in Anlehnung an den TTCT (6; 14; 19). Viele Studien nennen mehrere Definitionen gleichzeitig, um den vielfältigen Forschungsdiskurs zur Kreativität deutlich zu machen (4; 5; 6; 12; 14; 15; 19; 21; 22). Neun der Studien verweisen darüber hinaus explizit darauf, dass Kreativität trainiert und entwickelt werden kann (1; 3; 5; 6; 8; 10; 12; 15; 21). Drei Studien verzichten auf eine Definition der Kreativität und betonen stattdessen besonders ihre Relevanz als 21. Century Skill (11; 16; 17).

Vielfältige Modelle der Kreativität kamen ebenfalls zur Anwendung, vor allem Prozessmodelle, die Kreativität als sequenzielles Aufeinanderfolgen von bestimmten Phasen begreifen, z.B. das Modell von Guilford (7; 8; 10; 19). Außerdem wurden vermehrt Systemmodelle wie von Csikszentmihályi (4; 9) genannt, die Kreativität als Ergebnis des Wechselspiels zwischen Individuum, Domäne und Rezipient begreifen. Auch unterrichtsbezogene Modelle von Kreativität wie von Williams (10; 13), oder sogar spezifiziert für den Naturwissenschaftsunterricht von Hong (12), wurden beschrieben. Auch von diesen Modellen wurden teils mehrere in einer Studie genannt, um den facettenreichen Forschungsdiskurs abzubilden. Auffällig ist außerdem die Häufigkeit unterrichtsbezogener Kreativitätsmodelle.

Teilweise bestimmte das Modell die Wahl eines Erhebungsinstruments, so z.B. beim Modell von Hong, dass sich auf „Science Classroom Creativity“ bezieht. Das Erhebungsinstrument testete an dieser Stelle gezielt „Scientific Classroom Creativity“ (12) (siehe Kap. 3.4). Somit stellt sich die Frage der Bewertung der Kreativität als domänenspezifische oder domänenübergreifende Fähigkeit. Vier Studien verorten Kreativität als domänenspezifische Fähigkeit (8; 12; 20; 21), und fokussieren auf Kreativität im naturwissenschaftlichen Kontext mit methodisch-analytischem Denken („Scientific Creativity“). Im Gegensatz dazu verorten fünf Studien Kreativität als domänenübergreifende Fähigkeit (3; 5; 7; 8; 14). Die andere Hälfte der Studien nimmt zu dieser Frage keine Stellung.

5.5 Empirische Effekte auf Kreativität und deren Erhebung

Quantitativ werden mehrheitlich positive Effekte von STEAM-Interventionen auf die Kreativität berichtet. Über ein Viertel der Studien stellen signifikant positive Effekte fest (2; 4; 8; 14; 20). Positive Effekte werden von acht Studien berichtet (1; 6; 7; 10; 13; 15; 17; 21). Ein kleiner positiver Effekt wurde von drei Studien berichtet (12; 16; 18) und zwei stellten keinen Effekt fest (3; 5).

Dabei ist zu betonen, dass die Studie von Thuneberg et al. (2023) den Einfluss von Kreativität auf die Ergebnisse eines Wissenstests untersuchte und nicht die

Kreativität Prä/Post. Die Ergebnisse des Wissenstests unterschieden sich signifikant positiv, jedoch hatte nur eine der beiden untersuchten Variablen von Kreativität („ACT“ und „FLOW“), in diesem Fall „FLOW“, einen Einfluss auf die Post-Ergebnisse. Ob man die Studie daher unter „kleiner Effekt“ oder „kein Effekt“ (da sie die Kreativität nur zu einem Zeitpunkt misst) einordnet, ist aufgrund des leicht anderen Fokus‘ der Studie im Vergleich zu den anderen nicht ganz eindeutig. Es wurde dennoch entschieden, die Studie aufzunehmen, da sie eine Korrelation von „FLOW“ mit dem Ergebnis im Post-Wissenstest feststellt. Die Studie von Alexopoulos et al. (2021) fand signifikant positive Effekte der STEAM-Intervention nur auf „ACT“ im Prä/Post-Kreativitätstest. Auch in Verbindung mit der Studie von Conradt & Bogner (2019a), die weder bei „ACT“ noch bei „FLOW“ im Prä-Post-Kreativitätstest eine Veränderung feststellen konnte, ist dieses Ergebnis, dass „FLOW“ Einfluss auf die Leistung im Post-Wissenstest hat, interessant.

Der CPAC mit den Dimensionen „ACT“ und „FLOW“ wurde somit in vier Studien verwendet (2; 5; 6; 18). Die anderen Studien nutzten vor allem Variationen des TTCT (1; 4; 8; 13; 14). Ein weiterer domänenübergreifender Kreativitätstest ist in den Studien neben dem TTCT der „Alternative uses test“ von Guilford (7; 8). Zwei Studien nutzen darüber hinaus einen „Self-Assessment“-Fragebogen zu kreativen Fähigkeiten (7; 8). Domänenspezifische Testinstrumente waren der „Scientific Creativity Test“ (8; 20; 21) und der „Scientific Classroom Creativity Test“ (12). Weitere Studien nutzen darüber hinaus einen eigenen Fragebogen (17) oder einen Bewertungsbogen für das kreative Produkt (10).

Die qualitativen Analysen (als Teil von mixed-methods-Studien oder als qualitative Studie) nutzen Beobachtungen (12) und (Gruppen)-Interviews (13), um die Kreativität der Lernenden in STEAM Interventionen zu untersuchen (9; 11; 17; 22). Auch die kreativen Produkte werden analysiert (12; 19; 22). Daneben kommt auch die Analyse und Kodierung von Videoaufnahmen des kreativen Arbeitsprozesses zum Einsatz (19). Eine Studie erhob zusätzlich ein „visual journal“ (schriftlich und visuell) und ein „reflexion paper“ (schriftlich) (9). Die Studien stufen die Kreativität bei der Arbeit am STEAM-Projekt anhand von Interviews und Beobachtungen insgesamt als sehr hoch ein.

Darüber hinaus fokussieren die qualitativen Studien aus dem künstlerischen Bereich (9; 19) auf die kollektive Kreativität im Team, wobei das Potential für kreative Kollaboration anhand der Gruppeninterviews, der „visual journals“ und „reflexion paper“ als immens bewertet wird (9) und die Anzahl kodierter Einheiten in Videoaufnahmen der Gruppen auf ein hohes Maß an kollektiver Kreativität im Dialog über STEAM-Aufgabestellungen hindeutet (19). Außerdem konnte festgestellt werden, dass Lernende

während der STEAM Projekte ein Bewusstsein für den eigenen kreativen Prozess entwickeln (9).

6. Diskussion

Die Ergebnisse unterstreichen das Potenzial von STEAM zur Förderung kreativer Fähigkeiten, zeigen jedoch auch, dass die theoretische Fundierung des Ansatzes noch unklar ist. Besonders kritisch ist die unklare begriffliche Abgrenzung des A. Zwar gibt es eine Tendenz zur Definition des A in STEAM als „Arts“, allerdings lässt sich diese auch teilweise durch eine fehlende inhaltliche Tiefe bei der Definition des Ansatzes begründen. So wurde häufig nur das Akronym STEAM erklärt und wenig auf die „Arts“-Komponente eingegangen. Nur die beiden Studien aus künstlerischen/kunstdidaktischem Kontext beziehen sich konkret auf das Fach Kunst und beleuchten es genauer (9, 19). Kim et al. (2023), als einzige andere Studie, betrachten „Arts“ etwas differenzierter als die „freien Künste“ und gehen darauf ein, dass diese neben bildender Kunst auch Kunstgeschichte und Literatur beinhalten.

Diese Ergebnisse zum A in STEAM auf das K in MINKT zu übertragen ist grundsätzlich nur bedingt möglich, da das deutsche MINT das Fach Informatik anstatt dem engl. Engineering beinhaltet und somit MINT und STEM nicht gleichzusetzen sind. Aber selbst, wenn man eine gewisse Übertragbarkeit annimmt, sind die Ergebnisse mit Blick auf die Frage „K = Kunst oder Kreativität?“ wenig aussagekräftig. Die Tendenz zu „A = Arts“ kann auf das deutschsprachige „Kunst“ nicht eindeutig übertragen werden, da das Schulfach Kunst nur die bildende Kunst und ihre gestaltenden Praktiken einschließt und von Musik, Theater oder Literatur getrennt wird. Bereits Perignat & Katz-Buonincontro stellten 2018 fest, dass das A in STEAM uneinheitlich als „visual arts“ oder auch „performing arts (dance, music, theater)“ definiert wird, was sich hier erneut bestätigt.

Auch eine eindeutige deutschsprachige Definition des K als Kreativität ließe sich anhand der Ergebnisse nicht begründen, da keine der Studien, die „creativity“ für das A nennen, diese von „Arts“ getrennt betrachten. Darüber hinaus spricht auch die ungeklärte Frage nach der Domänenspezifität der Kreativität gegen eine solche Definition, da im Falle der Deutung von Kreativität als naturwissenschaftlichen Kreativität („Scientific Creativity“) die Facette der Kunst völlig aus dem Ansatz verschwinden würde.

Es scheint also vor dem Hintergrund von STEAM-Definitionen notwendig, eine erweiterte Bezeichnung für MINKT zu finden, die beide „Ks“ explizit beinhaltet und so fachsensibel differenziert betrachtet. Die bisherige systematische Literatursuche führte allerdings nicht zu deutschsprachigen Ergebnissen zum Thema. Es könnten daher statt des Suchstichworts „MINKT“ auch die einzelnen Fächer, z.B. „Physik“ und „Kunst“ in Verbindung mit „kreativ“ gesucht werden, da die Suche zum Stichwort MINKT bisher

keine themenbezogenen Ergebnisse liefern konnte. Hier deutet sich eine bestehende Forschungslücke zum deutschsprachigen MINKT-Ansatz an, die neue theoretische und empirische Forschung notwendig macht.

An dieser Stelle lässt sich darüber hinaus in Frage stellen, ob die zusammengetragenen empirischen Ergebnisse zur Förderung von Kreativität durch die STEAM-Interventionen überhaupt miteinander in Verbindung gebracht werden können, da in den Studien so unterschiedliche Definitionen, Modelle und Erhebungsinstrumente für die Kreativität verwendet wurden. Es lässt sich allerdings in Anbetracht des vielfältigen Forschungsdiskurses zum Konstrukt der Kreativität (s. Kap. 2) andersherum ebenso feststellen, dass sich über verschiedenste Facetten von Kreativität (domänenübergreifende und naturwissenschaftsspezifische, unterrichtsbezogene, jene, die auf divergentes Denken fokussieren und jene, die kollaborative Kreativität in den Blick nehmen) positive Effekte von STEAM-Interventionen auf die Entwicklung dieser Kreativitätsfacette feststellen lassen. Dies gibt womöglich einen Hinweis darauf, dass STEAM Kreativität in weiten Teilen fördern kann. Nicht bewertet werden können dabei allerdings die drei Studien, die keine Definition von Kreativität nannten.

In Anbetracht der Tatsache, dass 35% befragter Lehrkräfte Kreativität mit künstlerischem Tun gleichsetzen, wäre es darüber hinaus notwendig, dieses „Facettenreiche“ der Kreativität, dass sich im Forschungsdiskurs und auch in den hier untersuchten empirischen Studien zeigt, mehr in Schule und andere Bildungsinstitutionen zu tragen.

7. Fazit

STEAM – und mit gewissen Einschränkungen auch MINKT – bietet ein vielversprechendes Modell zur Förderung kreativer, interdisziplinärer Kompetenzen. Die Mehrheit der empirischen Studien berichtet von positiven Wirkungen auf die Kreativität. Allerdings bleibt unklar, wofür genau das K in MINKT stehen kann. Analysen des A in STEAM ergaben neben Kunst und Kreativität auch noch darstellende Künste wie Musik und Theater.

Für die deutschsprachige Forschung ergibt sich daraus ein doppelter Handlungsauftrag:

1. Entwicklung klarer, domänensensibler Theorierahmen für Kunst, Kreativität und MINT im gemeinsamen Unterricht.
2. Durchführung empirischer Studien zur Umsetzung von MINKT und zu seiner Wirksamkeit – idealerweise in Zusammenarbeit zwischen Kunst- und MINT-Lehrkräften mit Bildungsforschung.

Besonders im MINT-Fach Physik bietet sich viel Potenzial in der Verbindung mit der Kunst: Licht- und Farbmischungsexperimente, akustische Visualisierungen, mechanische Skulpturen, gestalterische Modellbildung – all dies kann Lernräume eröffnen, in

denen Kunst und Fachlichkeit ein kreatives produktives Spannungsverhältnis eingehen. Diese Potentiale gilt es, in zukünftiger Forschung theoretisch und empirisch vertieft zu untersuchen.

8. Studien aus dem Review

- 1 Abueita, J. D., Alsabeelah, A., & Humaidat, M. A. (2022). The impact of the STEAM approach on innovative thinking and academic achievement in the educational robot subject among eighth-grade students in Jordan. *Journal of Educational and Social Research*, 12(1), 188–203. <https://doi.org/10.36941/jesr-2022-0016>
- 2 Alexopoulos, A. N., Paolucci, P., Sotiriou, S. A., Bogner, F. X., Dorigo, T., Fedi, M., Michelotto, M., Paòletti, S., & Scianitti, F. (2021). The colours of the Higgs boson: A study in creativity and science motivation among high-school students in Italy. *Smart Learning Environments*, 8(23), 1–23. <https://doi.org/10.1186/s40561-021-00169-4>
- 3 Azaryuha, L., Broza, O., Cohen, S., Hershkovitz, S., & Adi-Japha, E. (2023). Development of creative thinking patterns via math and music. *Thinking Skills and Creativity*, 47, 101196. <https://doi.org/10.1016/j.tsc.2022.101196>
- 4 Chang, C.-Y., Du, Z., Kuo, H.-C., & Chang, C.-C. (2023). Investigating the impact of design thinking-based STEAM PBL on students' creativity and computational thinking. *IEEE Transactions on Education*, 99, 1–12. <https://doi.org/10.1109/TE.2023.3297221>
- 5 Conradt, C., & Bogner, F. X. (2019). From STEM to STEAM: Cracking the code? How creativity & motivation interact with inquiry-based learning. *Creativity Research Journal*, 31(3), 284–295. <https://doi.org/10.1080/10400419.2019.1641678>
- 6 Conradt, C., & Bogner, F. X. (2020). STEAM teaching professional development works: Effects on students' creativity and motivation. *Smart Learning Environments*, 7(26). <https://doi.org/10.1186/s40561-020-00132-9>
- 7 Gallagher, D., & Grimm, L. R. (2018). Making an impact: The effects of game making on creativity and spatial processing. *Thinking Skills and Creativity*, 28, 138–149. <https://doi.org/10.1016/j.tsc.2018.05.001>
- 8 Gu, X., Tong, D., Shi, P., Zou, Y., Yuan, H., & Chen, C. (2023). Incorporating STEAM activities into creativity training in higher education. *Thinking Skills and Creativity*, 50, 101395. <https://doi.org/10.1016/j.tsc.2023.101395>
- 9 Guyotte, K. W., Sochacka, N. W., Constantino, T. E., Kellam, N. N., & Walther, J. (2015). Collaborative creativity in STEAM: Narratives of art education students' experiences in transdisciplinary spaces. *International Journal of Education & the Arts*, 16(15). <http://www.ijea.org/v16n15/>
- 10 Hsiao, H.-S., Chen, J.-C., Chen, J.-H., Zeng, Y.-T., & Chung, G.-H. (2022). An assessment of junior high school students' knowledge, creativity, and hands-on performance using PBL via a cognitive–affective interaction model to achieve STEAM. *Sustainability*, 14(9), 5582. <https://doi.org/10.3390/su14095582>
- 11 Izadinia, R. (2023). "I could feel a kind of keen air of excitement": Using IVR to foster girls' confidence, interest, and engagement in STEAM. *Journal for STEM Education and Research*, 6, 456–479. <https://doi.org/10.1007/s41979-023-00108-7>
- 12 Kim, E. S., Chu, H.-E., & Song, J. (2023). Development and impact of an intercultural STEAM program on science classroom creativity. *Asia-Pacific Science Education*, 9, 106–141. <https://doi.org/10.1163/23641177-BJA10058>
- 13 Lu, S.-Y., Wu, C.-L., & Huang, Y.-M. (2022). Evaluation of disabled STEAM students' education learning outcomes and creativity under the UN sustainable development goal: Project-based learning-oriented STEAM curriculum with Micro:bit. *Sustainability*, 14(2), 679. <https://doi.org/10.3390/su14020679>
- 14 Ozkan, G., & Topsakal, U. U. (2021). Exploring the effectiveness of STEAM design processes on middle school students' creativity. *International Journal of Technology and Design Education*, 31(95), 95–116. <https://doi.org/10.1007/s10798-019-09547-z>
- 15 Putri, A. S., Prasetyo, Z. K., Purwastuti, L. A., Prodjosantoso, A. K., & Putranta, H. (2023). Effectiveness of STEAM-based blended learning on students' critical and creative thinking skills. *International Journal of Evaluation and Research in Education*, 12(1), 44–52. <http://doi.org/10.11591/ijere.v12i1.22506>
- 16 Salmi, H., Thuneberg, H., Bogner, F. X., & Fenyvesi, K. (2021). Individual creativity and career choices of pre-teens in the context of a math-art learning event. *Open Education Studies*, 3, 147–156. <https://doi.org/10.1515/edu-2020-0147>
- 17 Setyanto, A., Murtiyasa, B., & Sumardi. (2020). Development of 21st-century skills in mathematics learning with STEAM in MTs Negeri 2 Wonogiri. *Universal Journal of Educational Research*, 8(11), 5513–5528. <https://doi.org/10.13189/ujer.2020.081155>
- 18 Thuneberg, H. M., Salmi, H. S., & Bogner, F. X. (2018). How creativity, autonomy, and visual

- reasoning contribute to cognitive learning in a STEAM hands-on inquiry-based math module. *Thinking Skills and Creativity*, 29, 153–160. <https://doi.org/10.1016/j.tsc.2018.07.003>
- 19 Timotheou, S., & Ioannou, A. (2021). Collective creativity in STEAM making activities. *The Journal of Educational Research*, 114(2), 130–138. <https://doi.org/10.1080/00220671.2021.1873721>
- 20 Tran, N.-H., Huang, C.-F., & Hung, J.-F. (2021). Exploring the effectiveness of STEAM-based courses in junior high school students' scientific creativity. *Frontiers in Education*, 6. <https://doi.org/10.3389/feduc.2021.666792>
- 21 Tran, N.-H., Huang, C.-F., Hsiao, K.-H., Lin, K.-L., & Hung, J.-F. (2021). Investigation on the influences of a STEAM-based curriculum on the scientific creativity of elementary school students. *Frontiers in Education*, 6. <https://doi.org/10.3389/feduc.2021.694516>
- 22 Weng, X., Ng, O.-L., Cui, Z., & Leung, S. (2023). Creativity development with problem-based digital making and block-based programming for science, technology, engineering, arts, and mathematics learning in middle school contexts. *Journal of Educational Computing Research*, 61(2), 304–328. <https://doi.org/10.1177/07356331221115661>
- 9. Suchstrings**
- Scopus**
- TITLE-ABS-KEY (creativ* OR kreativ*) AND TITLE-ABS-KEY (steam OR minkt) AND SUBJAREA (psyc OR soci OR arts) AND LANGUAGE (english OR german) AND PUBYEAR > 2003 AND PUBYEAR < 2024 AND DOCTYPE (ar OR re) AND NOT INDEX (medline) AND NOT TITLE (medical OR medicine OR clinical OR health OR tourism OR politics OR sociology)
- Web of Science**
- TS=(creativ* OR kreativ*) AND TS=(“steam” OR “minkt”) AND LA=(English) AND PY=(2004-2023) AND DT=(Article OR Review) NOT TI=(medical OR medicine OR clinical OR health OR tourism OR politics OR sociology) NOT SU=(engi* OR comp* or busi* or econ* or math*)
- 10. Literatur**
- Aguilera Morales, David & Ortiz-Revilla, Jairo. (2021). STEM vs. STEAM Education and Student Creativity: A Systematic Literature Review. *Education Sciences*. 11. 331. <https://doi.org/10.3390/educsci11070331>
- Aljughaiman, A., & Mowrer-Reynolds, E. (2005). Teachers' conceptions of creativity and creative students. *The Journal of Creative Behavior*, 39, 17–34. <https://doi.org/10.1002/j.2162-6057.2005.tb01247.x>
- Berner, N., & Glaser-Henzer, E. (2022). Kunst als Unterrichtsfach. In *Handbuch Schulforschung*. Springer.
- Bertelsmann Stiftung, Deutsche Telekom Stiftung, Education Y e.V., Global Goals Curriculum & Siemens Stiftung. (2019). *OECD Lernkompass 2030*. <https://www.bertelsmann-stiftung.de/de/publikationen/publikation/did/oecd-lernkompass-2030-all>.
- Buschkühle, C. P. (2017). Bildung im künstlerischen Projekt. In *Fokussierte Komplexität. Ebenen von Kunst und Bildung* (S. 261–265). ATHENA.
- Bush, S. B., & Cook, K. L. (2019). Structuring STEAM inquiries: Lessons learned from practice. In M. S. Khine & S. Areepattamannil (Eds.), *STEAM Education* (pp. 19–35). Springer.
- Colucci-Gray, L., Burnard, P., Cooke, C., Davies, R., Gray, D., & Trowsdale, J. (2017). Reviewing the potential and challenges of developing STEAM education through creative pedagogies for 21st learning: How can school curricula be broadened towards a more responsive, dynamic, and inclusive form of education? (BERA Research Commission). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.22452.76161>
- Csikszentmihályi, M. (1999). Implications of a systems perspective for the study of creativity. In R. J. Sternberg (Hrsg.), *Handbook of creativity* (S. 313–335). Cambridge University Press.
- Düchs, G., & Runge, E. (2023). Studium in der Verlängerung: Statistiken zum Physikstudium in Deutschland. *Physik Journal*, 22(8/9), 33–39.
- Fthenakis, W. E. (2016). Aus MINT wird MINKT: Neue Verbindung von MINT und Kunst. *Niedersächsisches Institut für frühkindliche Bildung und Entwicklung (nifbe)*. <https://www.nifbe.de/fachbeitraege/aus-mint-wird-minkt/>
- Guilford, J. P. (1950). Creativity. *American Psychologist*, 5, 444–454.
- Guilford, J.P., Christensen, P.R., Merrifield, P.R., & Wilson, R.C. (1978). *Alternate Uses: Manual of instructions and interpretations*. Orange, CA: Sheridan Psychological Services.
- Haft, M. (2023, 29. August). Von MINT zu MINKT: Mit Kunst zu neuen Fachkräften. *Bundesagentur für Arbeit*. <https://www.arbeitsagentur.de/faktor-a/arbeitswelt-gestalten/mit-minkt-zu-kreativen-mint-fachkraeften>.
- Irwanto, Irwanto & Ananda, Lintang. (2024). A systematic literature review of STEAM education in the last decade. <https://doi.org/10.1063/5.0182945>
- Kaufman, J. C., & Beghetto, R. A. (2009). Beyond big and little: The four C model of creativity.

- Review of General Psychology, 13(1), 1–12.
<https://doi.org/10.1037/a0013688>.
- Krüger, Wilson & Chiappe, Andres. (2021). 21st-century skills and their relationship to STEAM learning environments: a review. *Revista de Educación a Distancia*, 21(9), 1-22.
<https://doi.org/10.6018/red.470461>.
- Mintuitiv. (2021). MINKT – Wie Kunst MINT auf das nächste Level hebt. <https://www.mintuitiv.de/blogs/mint/minkt-wie-die-kunst-mint-auf-das-nachste-level- hebt>.
- Newton, L., & Beverton, S. (2012). Pre-service teachers' conceptions of creativity in elementary school English. *Thinking Skills and Creativity*, 7, 165–176.
<https://doi.org/10.1016/j.tsc.2012.02.002>
- Perignat, E., & Katz-Buonincontro, J. (2019). STEAM in practice and research: An integrative literature review. *Thinking Skills and Creativity*, 31, 31–43.
<https://doi.org/10.1016/j.tsc.2018.10.002>
- Poincaré, H. (1908). *Science and Methods* (F. Maitland, Trans.). Cosimo Inc. (Reprint 2012).
- Rhodes, M. (1961). An analysis of creativity. *Phi Delta Kappan*, 42, 305–311.
- Runco, M. A., & Jaeger, G. J. (2012). The standard definition of creativity. *Creativity Research Journal*, 24(1), 92–96.
<https://doi.org/10.1080/10400419.2012.650092>
- Torrance, E. P. (1981a). Predicting the creativity of elementary school children (1958 80) and the teacher who "made a difference." *Gifted Child Quarterly*, 25, 55-62.
- Torrance, E. P. (1981b). Empirical validation of criterion-referenced indicators of creative ability through a longitudinal study. *Creative Child and Adult Quarterly*, 6, 136-140.
- Urban, K. K. (2004). *Kreativität: Herausforderung für Schule, Wissenschaft und Gesellschaft* (1. Aufl.). LIT Verlag.
- Wallas, G. (1926). *The Art of Thought*. C.A. Watts & Co.
- Willems, K. (2007). *Schulische Fachkulturen und Geschlecht: Physik und Deutsch – natürliche Gegenpole?* (Bd. 10). transcript.
- Ziegler, A., Antes, G., & König, I. (2011). Bevorzugte Report Items für systematische Übersichten und Meta-Analysen: Das PRISMA-Statement. *DMW – Deutsche Medizinische Wochenschrift*, 136(8), e9–e15.
<https://doi.org/10.1055/s-0031-1272978>

AR Physics Table

- Interaktive Experimentiertische für das experimentelle Lernen im Schülerlabor -

Fabian Bernstein*, **Thomas Wilhelm⁺**

*TECHNOSEUM, Museumsstr. 1, 68165 Mannheim, ⁺Institut für Didaktik der Physik, Goethe-Universität Frankfurt, Max-von-Laue-Str. 1, 60438 Frankfurt
fabian.bernstein@technoseum.de, wilhelm@physik.uni-frankfurt.de

Kurzfassung

Der Beitrag stellt ein neuartiges Konzept zur Integration von Augmented Reality (AR) in die physikalische Experimentierpraxis an außerschulischen Lernorten vor. Der AR Physics Table kombiniert reale Versuchsaufbauten mit digitalen Aufprojektionen, interaktiven Visualisierungen und narrativen Elementen. Ziel ist es, physikalische Konzepte sichtbar zu machen, Prinzipien wie Just-in-Time-Information, Storytelling und Gamification für die Experimentierpraxis zu erschließen und Experimentiermaterialien und -aufbauten um digitale Funktionalitäten zu erweitern. Der Artikel beschreibt das Systemkonzept, erläutert die zugrunde liegenden didaktischen Zielsetzungen und berichtet von ersten prototypischen Erprobungen im TECHNOSEUM Mannheim. Damit eröffnet der Ansatz neue Möglichkeiten, skalierbare, robuste und niedrigschwellige Implementierungen digital erweiterter Experimente in Schülerlaboren und Science Centern zu realisieren.

1. Digitale Erweiterungen für das Lernen am Experiment

Außerschulische Lernorte wie Schülerlabore oder Science Center bieten wichtige Gelegenheiten, um Schülerinnen und Schüler für Naturwissenschaften und Technik zu begeistern und zugleich ihre experimentellen Kompetenzen zu fördern [1]. Häufig zeigt sich jedoch ein Spannungsverhältnis zwischen den aufwendigen und fortschrittlichen Experimentieraktivitäten und der Aufbereitung des Begleitmaterials: Während viele Lernorte über ansprechende und technisch fortschrittliche Versuchsaufbauten verfügen, bleiben Arbeitsanleitungen und didaktische Medien oftmals analog, linear strukturiert und wenig interaktiv.

In einer zunehmend digital geprägten Lebenswelt wirken analoge Schritt-für-Schritt-Anleitungen nicht nur wenig motivierend, sondern bieten auch kaum Anknüpfungspunkte an die medialen Erfahrungswelten heutiger Jugendlicher. Augmented Reality (AR) kann hier neue didaktische Möglichkeiten eröffnen, indem physikalische Experimente um digitale Informations-, Visualisierungs- und Interaktionsebenen ergänzt werden.

2. Systembeschreibung: Der AR Physics Table

Der AR Physics Table ist eine am TECHNOSEUM Mannheim entwickelte projektionsbasierte Augmented-Reality-Plattform, die es ermöglicht, reale Versuchsaufbauten durch digitale Inhalte zu erweitern. Eine zentrale Herausforderung bei der Integration digitaler Technologien in Schülerlabore und Science Center besteht darin, praxistaugliche Lösungen zu entwickeln – also Systeme, die auch unter intensiver Nutzung im Regelbetrieb zuverlässig funktionieren,

wartungsarm sind und sich wirtschaftlich betreiben lassen.

Das vorgestellte System unterscheidet sich dabei in wesentlichen Aspekten sowohl von AR-Ansätzen mit Head-Mounted Displays [2] als auch von mobilen Anwendungen, die auf Tablets oder Smartphones basieren [3-6]. Während Head-Mounted Displays aufgrund des hohen Aufwandes sowohl bei der Entwicklung der Inhalte als auch im laufenden Betrieb bislang vorrangig in kleinskaligen Szenarien, etwa in Hochschulpraktika, eingesetzt werden und nur begrenztes Transferpotenzial besitzen, sind mobile AR-Anwendungen zwar prinzipiell praxistauglich, weisen jedoch meist nur einen geringen Immersionsgrad auf. Das am TECHNOSEUM Mannheim entwickelte AR-System verfolgt hingegen einen dezidiert pragmatisch-immersiven Ansatz: Im Sinne des KISS-Prinzips („Keep It Simple, Stupid“) [7] stehen Skalierbarkeit, technische Robustheit und einfache Wartung im Vordergrund – mit dem Ziel, eine nachhaltige Integration in reale Bildungskontexte zu ermöglichen, ohne auf immersive Lernszenarien zu verzichten.

Das entwickelte System (siehe Abbildung 1) besteht aus einer Reihe von Standardkomponenten, um Aufprojektion und Interaktion zu realisieren:

- einem Kurzstanz-Projektor, der interaktive Inhalte auf die Experimentierfläche projiziert,
- einem Minicomputer (NUCbox), der AR-Logik, Visualisierungen und Benutzerinteraktion in Echtzeit steuert,
- einem Touchscreen oder wahlweise einem Tablet, über das die Benutzerinteraktion gesteuert wird,

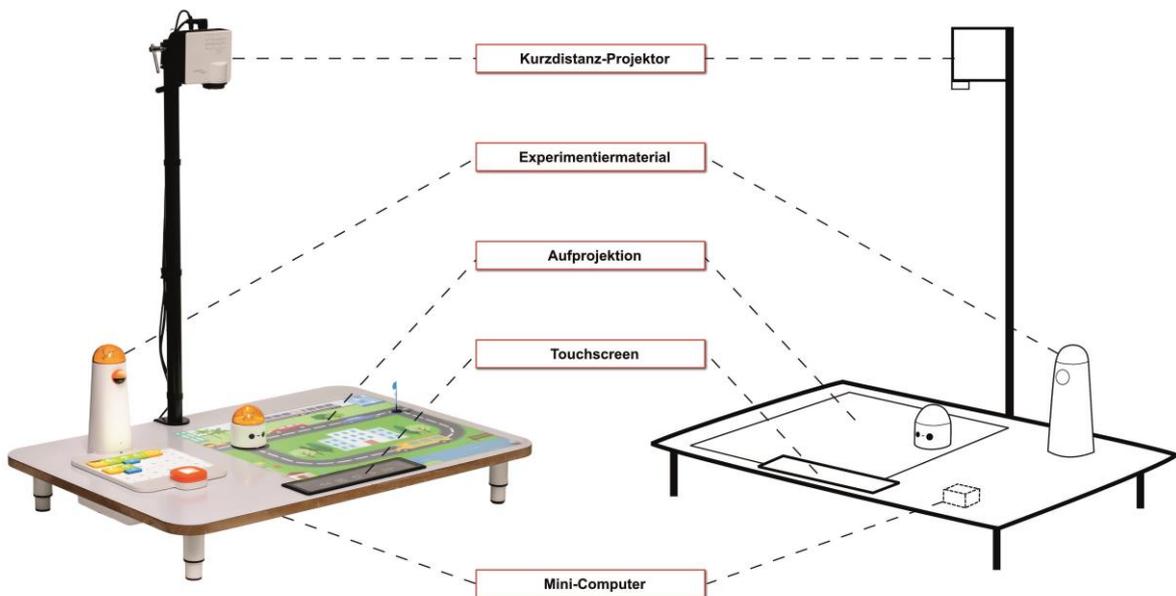


Abb. 1: Prototyp der AR Physics Table mit Lernmaterial zum Coding in der Primarstufe (eigene Darstellung) mit abgebildeter Vorlage von Envato Elements, lizenziert 31.5.2025

- sowie variablen Experimentiermaterialien – je nach Anwendungszweck bestehend aus Standard-Lehrmitteln oder eigens 3D-gedruckten Komponenten.

Je nach didaktischem Szenario lassen sich unterschiedliche Varianten realisieren: So kann der Experimentiertisch etwa als magnetisches Whiteboard gestaltet werden, beispielsweise durch den Einsatz spezieller Projektionsfolien oder pulverbeschichteter Metallplatten, um die Arbeit mit magnetischen Experimentiermaterialien zu erleichtern. Auch eine Überstischmontage in Verbindung mit Standard-Throw-Projektoren ist möglich und im Rahmen des Aufbaus eines neuartigen Innovationslabors am TECHNOSEUM Mannheim geplant.

3. Einordnung in den Stand der Technik

Der hier verfolgte Ansatz unterscheidet sich deutlich von früheren Arbeiten, die projektionsbasierte Interaktionen in Bildungskontexten – teilweise auch im naturwissenschaftlichen Bereich – explorativ untersucht haben. Bereits in den frühen 2010er Jahren wurden erste Experimente mit Aufprojektionen in Kombination mit markerbasiertem Tracking erprobt [8]. Weitere Entwicklungen, wie das Projekt Enlight am MIT Media Lab [9], integrierten fortgeschrittene Computer-Vision-Algorithmen zur markerlosen Objekterkennung. Dort wurden neben spielerischen Anwendungen für Grundschüler auch physikalische Lernsettings realisiert – etwa im „Fields Playground“, der magnetische Feldlinien in Abhängigkeit von der Position realer Magnete auf der Projektionsfläche sichtbar macht. Schließlich wurden, beispielsweise im Projekt PapARt [10], auch Hand- und Fingertracking in Aufprojektionssysteme integriert, um weitere Interaktionsmöglichkeiten zu schaffen. Allen genannten Ansätzen ist gemeinsam, dass sie eine eher

begrenzte didaktische Tiefe aufweisen und primär als Proof-of-Concepts konzipiert sind, mit dem Ziel, technologische Möglichkeiten exemplarisch auszuloten.

Auffällig ist auch, dass keines dieser Systeme über den Projektstatus hinaus nennenswerte Verbreitung erlangt hat. Dies dürfte auf eine Kombination mehrerer Faktoren zurückzuführen sein: technische Komplexität, fehlende Standardisierung, Mangel an kritischer Masse sowie ein hoher Aufwand bei der Inhaltserstellung. Dabei wird ein grundlegender Zielkonflikt deutlich: Einerseits versprechen fortschrittliche, möglichst intuitive Interaktionsformen ein hohes didaktisches Potenzial, erfordern jedoch komplexe Hard- und Software. Andererseits bedarf es für einen dauerhaft stabilen und wirtschaftlichen Betrieb in Bildungseinrichtungen möglichst wartungsarmer und robust einsetzbarer Systeme – was wiederum die Tiefe und Vielfalt der Interaktion einschränkt. Wir argumentieren, dass dieser Zielkonflikt im Kontext von Schülerlaboren und Science Centern zugunsten der Robustheit aufzulösen ist. Im Unterschied zu kleinskaligen Forschungsstudien handelt es sich um produktive Lernumgebungen mit hoher Nutzungsfrequenz, in denen langfristig einsetzbare und zuverlässig funktionierende Systeme erforderlich sind. Nichtsdestotrotz werden am TECHNOSEUM derzeit weiterführende Prototypen des AR Physics Table entwickelt (siehe bspw. Abbildung 2), die teils auch zusätzliche Technologien wie RGB-D-Kameras integrieren. Dabei gilt weiterhin der Anspruch, die Systemstabilität und Alltagstauglichkeit auch bei technologischer Erweiterung nicht zu gefährden.

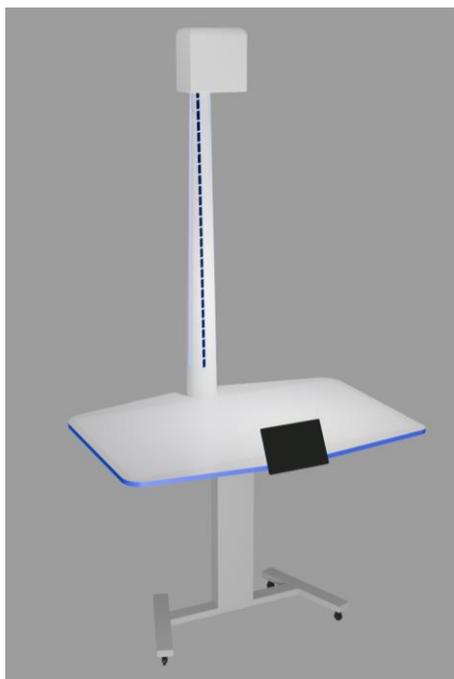


Abb. 2: Weiterentwickelter AR Physics Table mit Tablet zur Benutzersteuerung (eigene Darstellung)

4. Didaktisches Design: Von Gamification bis Storytelling

Aus didaktischer Perspektive bieten AR-Experimentiertische, wie der hier vorgestellte, vielfältige Potenziale, die sowohl neue Interaktionsmuster ermöglichen als auch zentrale Herausforderungen des physikalischen Experimentierens adressieren:

- a) Transformation des Experimentierens: Statische Anleitungen werden durch dynamische, visuelle und interaktive Instruktionen ersetzt, die sich an das Verhalten der Nutzerinnen und Nutzer anpassen.
- b) Erhöhung der Lernmotivation: Gamification, narrative Elemente und simulationsbasierte Herausforderungen steigern das Engagement und fördern das Immersionserlebnis.
- c) Sichtbarmachung unsichtbarer Phänomene: AR ermöglicht die Sichtbarmachung von an-sich unsichtbaren Vorgängen wie bspw. subatomaren Prozessen sowie die Möglichkeit der Visualisierung von physikalischen Größen (z.B. elektrische oder magnetische Felder).
- d) Erweiterung des experimentellen Spektrums: Die AR-Science Table ermöglicht hybride Experimente, die in Schülerlaboren aus sicherheitstechnischen oder praktischen Gründen nicht durchführbar wären – etwa Versuche mit Hochspannung oder zu quantenphysikalischen Systemen.
- e) Optimierung der Workshop-Betreuung: Das System bietet Just-in-Time-Informationen und Hilfestellungen und reduziert so den Unterstützungsaufwand durch Lehrkräfte oder Betreuende, insbesondere bei heterogenen Lerngruppen.

Am TECHNOSEUM Mannheim wurden verschiedene Prototypen des AR-Experimentiertisches realisiert und in ersten Evaluationen erprobt. Dabei zeichnet sich die grundsätzliche Tragfähigkeit des gewählten Ansatzes ab: Das System ist intuitiv bedienbar, technisch stabil und organisatorisch gut handhabbar. Erprobt wurde dabei sowohl ein Einsatz in Kombination mit Experimentiermaterial zum Programmieren-Lernen für Grundschüler als auch – am anderen Ende des Spektrums – fortgeschrittene Experimente zur Quantenphysik.

5. Ausblick

Aktuell wird das System sowohl hardware- also auch softwareseitig weiterentwickelt und sukzessive um zusätzliche Module ergänzt. Ziel ist es, sowohl mobile Demonstratoren für den Einsatz innerhalb und außerhalb des TECHNOSEUM bereitzustellen als auch das entstehende Innovationslabor am Haus standardmäßig mit der AR-Technologie auszustatten. Langfristig ist eine Bereitstellung als Open-Source-System vorgesehen. Damit soll der AR Physics Table als Referenzprojekt für die digitale Erweiterung physikalischer bzw. naturwissenschaftlicher Experimente etabliert werden und zugleich eine nachhaltige Plattform für interaktives, immersives und innovatives Experimentieren entstehen.

6. Literatur

- [1] Euler, M., & Schüttler, T. (2013). Schülerlabore. In Kircher, E., Girwidz, R., & Fischer, H. E. (Hrsg.) Physikdidaktik | Methoden und Inhalte (4. Aufl.). Springer Spektrum, 127-166.
- [2] Laumann, D., Schlummer, P., Abazi, A., et al. (2024). Analyzing the effective use of augmented reality glasses in university physics laboratory courses for the example topic of optical polarization. *Journal of Science Education and Technology*, 33(5), 668-685.
- [3] Stolzenberger, C., Frank, F., Trefzger, T. (2025). Multimedia-supported electricity teaching via the application "PUMA : Spannungslabor". *J. Phys.: Conf. Ser.* 2950 012020 <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2950/1/012020>
- [4] Kraus, S., & Trefzger, T. (2024). PUMA: Optiklabor - Eine webbasierte AR-Simulation für die Sekundarstufe I. *PhyDid B - Didaktik Der Physik - Beiträge Zur DPG-Frühjahrstagung*. Abgerufen von <https://ojs.dpg-physik.de/index.php/phydid-b/article/view/1451>
- [5] Lhotzky, J. F., Schimmelpfennig, F., & Wendt, K. (2020). Augmented Physik AR im Physikunterricht. *PhyDid B-Didaktik der Physik-Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*.
- [6] Lhotzky, J. F., & Wendt, K. (2023). Augmented Reality Experimente AR.X (download, print, cut, explore). *PhyDid B - Didaktik Der Physik - Beiträge Zur DPG-Frühjahrstagung*. Abgerufen von <https://ojs.dpg-physik.de/index.php/phydid-b/article/view/1381>

- [7] Johnson, C. L. (2012). *Kelly: more than my share of it all*. Smithsonian Institution.
- [8] Do-Lenh, S., Jermann, P., Legge, A., Zufferey, G., & Dillenbourg, P. (2012). TinkerLamp 2.0: designing and evaluating orchestration technologies for the classroom. In *21st Century Learning for 21st Century Skills: 7th European Conference of Technology Enhanced Learning, EC-TEL 2012, Saarbrücken, Germany, September 18-21, 2012, Proceedings 7*, Springer Berlin Heidelberg, 65-78.
- [9] Saw, Y. (2014). *Enlight: a projected augmented reality approach to science education* (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology).
- [10] Paper Augmented Reality Toolkit – interactive projection for Processing.
<https://github.com/natar-io/PapARt>

ChatGPT im Lehr-Lern-Labor

- Potenziale eines KI-basierten Assistenten bei der Entwicklung von
Experimentierumgebungen -

Patrick Herz*, Jens Damköhler*, Wolfgang Lutz*, Thomas Trefzger*

*Lehrstuhl für Physik und ihre Didaktik, Universität Würzburg
patrick.herz@stud-mail.uni-wuerzburg.de

Kurzfassung

Mit der Veröffentlichung von ChatGPT im November 2022 hat Künstliche Intelligenz (KI) unzählige neue Möglichkeiten zur Unterstützung unseres Alltags geschaffen. Auch im Bildungsbereich eröffnen sich durch KI neue Möglichkeiten zur Erweiterung bestehender Lehrformate und -methoden, beispielsweise durch den Einsatz von Chatbots als unterstützende Lehrassistenten.

Vor diesem Hintergrund wurde ein KI-gestützter Chatbot für ein Lehr-Lern-Labor auf Basis didaktischer Prinzipien in ChatGPT entwickelt, um Studierende bei der Entwicklung von Experimentierumgebungen für Schülerinnen und Schüler zu unterstützen. Nach einer mehrwöchigen Nutzung durch die Studierenden wurde die Akzeptanz des Chatbots mittels leitfadengestützter Interviews evaluiert. Die Transkripte wurden auf Basis des Technologieakzeptanzmodells (TAM) qualitativ analysiert, um zu erfassen, wie die Studierenden den Chatbot nutzen und bewerten. Die Ergebnisse zeigen, dass die Studierenden den Chatbot intensiv zur Ideenfindung und anfänglichen Planung ihrer Stationen nutzten, während die Nutzung im weiteren Verlauf der Stationsentwicklung abnahm. Insgesamt wurde der Chatbot hinsichtlich seiner Nützlichkeit und Benutzerfreundlichkeit überwiegend positiv bewertet. Zugleich verdeutlichen die Ergebnisse die Grenzen solcher generativer KI-Systeme und die Relevanz individueller sowie kontextueller Einflussfaktoren.

1. Einleitung

Im Jahr 1966 veröffentlichte Joseph Weizenbaum das Computerprogramm ELIZA, das durch einfache Mustererkennung und Textsubstitution eine psychotherapeutische Gesprächssituation simulierte. Obwohl dieser frühe Chatbot keinerlei inhaltliches Verständnis besaß, zeigten Nutzende oft unerwartet starke emotionale Reaktionen bei der Interaktion mit ihm. Weizenbaum selbst war von diesen Reaktionen überrascht und setzte sich kritisch mit der Bewertung der Fähigkeiten solcher Systeme auseinander (Weizenbaum, 1976). ELIZA legte den Grundstein für die jahrzehntelange Weiterentwicklung computergestützter Kommunikation und stellte zugleich eine frühe Vorstufe dessen dar, was heute als generative Künstliche Intelligenz (KI) bezeichnet wird. Unter generativer KI verstehen wir Systeme, die auf Basis umfangreicher Trainingsdaten eigenständig neue Inhalte erzeugen können (Marineau, 2023). Heute, fast sechs Jahrzehnte später, wirkt ELIZA auf uns primitiv und wie ein nettes Spielzeug. Die Systeme, die wir heute verwenden können, sind dies jedoch bei Weitem nicht mehr. Die Fähigkeiten generativer KI sind immens gewachsen. So können große Sprachmodelle (Large Language Models, kurz LLMs) wie etwa GPT-4o von OpenAI, kohärente und kontextbezogene Texte generieren.

Durch diese erweiterten technischen Möglichkeiten wächst allerdings auch die Verantwortung für einen reflektierten und sinnvollen Einsatz, insbesondere im Bildungsbereich. Ein Großteil der Studierenden nutzt

bereits jetzt Chatbots zu verschiedensten Zwecken (Lutz et al. (im Druck), 2024; von Garrel & Mayer, 2025), was auch neue Fragen zur Integration dieser Technologien in der Lehrkräftebildung aufwirft.

Die vorliegende Studie untersucht, wie angehende Physiklehrkräfte einen Chatbot im Rahmen eines fachdidaktischen Seminars nutzen und wahrnehmen. Dabei stehen insbesondere die Aspekte der Nützlichkeit, Benutzerfreundlichkeit sowie die individuellen Einflussfaktoren auf die Technologieakzeptanz im Fokus.

2. Theoretischer Hintergrund

2.1. KI-basierte Unterstützung in der Lehrkräftebildung

Bereits seit drei Jahrzehnten ist die Forschung zu KI in der Bildung präsent (Zawacki-Richter et al., 2019). Seit dem Durchbruch der generativen KI (wie ChatGPT) rückte der Einsatz einer solcher KI jedoch verstärkt in den Fokus der Bildungsforschung (Wang et al., 2024).

Von Garrel & Mayer (2025) kommen in einer im Jahr 2025 bundesweit durchgeführten Studie auf einen Anteil von rund 91,6% der Studierenden, die KI-Tools für ihr Studium nutzen, am häufigsten ChatGPT. Unter den Lehramtsstudierenden liegt die Nutzungsrate in dieser Studie mit 89,2% nur geringfügig darunter. Diese Zahlen heben den breiten Zugang zu KI-Tools in der Hochschulbildung auch unter angehenden Lehrkräften hervor.

Mit dem rasanten Aufstieg generativer KI-Systeme in den letzten Jahren stellt sich zunehmend die Frage, wie diese Entwicklung in der Lehrkräftebildung berücksichtigt werden kann. In der Debatte steht oft die Förderung der KI-Kompetenz von Lehrkräften als wichtiger Forschungsbereich im Vordergrund (vgl. Huwer et al., 2024; KMK, 2024; Vo & Pancratz, 2023). Die Frage nach der Akzeptanz von KI-Systemen bei (angehenden) Lehrkräften findet hingegen weniger Beachtung. Gerade Lehramtsstudierende nehmen dabei eine Doppelrolle ein: Sie sind nicht nur Lernende an der Universität, sondern auch zukünftige Lehrkräfte an Schulen, deren Einstellungen und Erfahrungen mit KI den späteren Unterricht mitprägen können.

Dabei zeigen empirische Befunde, dass die Technologieakzeptanz einen entscheidenden Einfluss auf die Entwicklung der digitalen Kompetenz hat. In einer Studie mit 667 Lehramtsstudierenden konnten Knoth & Haider (2023) nachweisen, dass eine höhere Akzeptanz digitaler Technologien signifikant mit einer höheren Einschätzung der eigenen Kompetenz einhergeht. Zusätzlich zu diesem Einfluss gilt die Technologieakzeptanz seit Langem als verlässlicher Prädiktor für die Absicht, neue Technologien zu nutzen (vgl. King & He, 2006).

Für die Lehrkräftebildung bedeutet dies: Nur wenn die Zielgruppe KI-gestützte Systeme akzeptiert, können geeignete Maßnahmen zur Förderung der KI-Kompetenz greifen. Eine Analyse der Akzeptanz kann dabei aufzeigen, welche Rahmenbedingungen, Nutzungserwartungen oder Herausforderungen für angehende Lehrkräfte eine Rolle spielen.

Die vorliegende Studie setzt genau an diesem Punkt an: Sie untersucht die Technologieakzeptanz generativer KI in der Physiklehrkräftebildung – also dort, wo auch eine erste Förderung von KI-Kompetenz ansetzen kann. Im Zentrum dieser Studie steht daher, wie Lehramtsstudierende der Physik einen Chatbot als Unterstützung bei der Planung und Ausarbeitung von Experimentierstationen erleben und bewerten.

2.2. Das Technologieakzeptanzmodell

Mit dem Technologieakzeptanzmodell (TAM) versucht Davis et. al (1989) die Akzeptanz einer Technologie durch Nutzende systematisch zu erklären, vorherzusagen und letztlich auch gezielt zu verbessern. Das TAM gehört zu den am häufigsten verwendeten theoretischen Modellen zur Untersuchung der Einführung neuer Technologien (Davis & Granić, 2024) - auch im Bildungsbereich (Granić & Marangunic, 2019).

Im Zentrum des TAM (siehe Abb. 2) stehen dabei zwei zentrale Konstrukte: die wahrgenommene Nützlichkeit (WN) und die Wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit (WB). Unter der WN versteht Davis et al. (1989) die subjektive Einschätzung einer Person, ob der Einsatz einer Technologie dabei hilft, Aufgaben effizienter oder erfolgreicher zu bewältigen. Die

WB bezieht sich hingegen, auf die Erwartung wie unkompliziert und mühelos sich die Technologie bedienen lässt. Beide Konstrukte wirken sich auf die Nutzungsintention aus, die wiederum als unmittelbarer Prädiktor für die tatsächliche Nutzung gilt (vgl. King & He, 2006). Ergänzt wird das Modell durch sogenannte externe Variablen (EV), die die WN und WB beeinflussen können. Dabei kann es sich beispielsweise um vorangehende Nutzungserfahrungen (Jackson et al., 1997), Persönlichkeitsmerkmale (Svendens et al., 2013) oder Vertrauen (Beldad & Hegner, 2018) handeln.

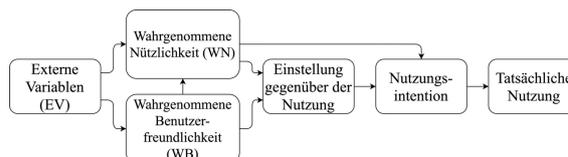


Abb. 1: Technologieakzeptanzmodell (nach Davis et al., 1989). Eigene Darstellung.

Das ursprüngliche TAM wurde in den letzten Jahren vielfach weiterentwickelt. So differenziert das TAM2 (Venkatesh & Davis, 2000) beispielsweise externe Einflussgrößen weiter aus, während die Unified Theory of Acceptance and Use of Technology (UTAUT) (Venkatesh et al., 2003) zudem Elemente weiterer Akzeptanzmodelle integriert. Dennoch zeigen verschiedene Studien, dass das TAM in seiner Klarheit und Validität überzeugen kann (z.B. King & He, 2006; Ma & Liu, 2004). Auch im Bildungskontext belegten Scherer et al. (2019) in einer Metaanalyse, dass das Modell sowohl bei Lehrkräften als auch bei Lehramtsstudierenden zuverlässige Ergebnisse liefert.

Zudem ist das TAM im Hinblick auf die Akzeptanz von KI-Technologien relevant. Eine aktuelle Metaanalyse von Ali et al. (2024) vergleicht das TAM mit dem UTAUT und kommt zu dem Ergebnis, dass das TAM am besten geeignet ist, um die Akzeptanz von KI-basierten Anwendungen im Bildungsbereich zu erfassen. Die Flexibilität des TAMs erlaubt zudem, mögliche neue Einflussfaktoren, die im Kontext von Chatbots auftreten, als externe Variablen zu integrieren.

2.3. Lehrveranstaltungsformat „Lehr-Lern-Labor“ in Würzburg

Das Lehr-Lern-Labor (LLL) an der Universität Würzburg ist ein verpflichtendes fachdidaktisches Veranstaltungsformat für angehende Physiklehrkräfte an Gymnasien und Realschulen. In diesem können die Studierenden zusätzlich zur didaktischen Ausbildung Praxiserfahrungen sammeln. Die Studierenden befinden sich meist im 7. Semester, bringen dabei unterschiedlich viele Erfahrungen aus der Unterrichtspraxis mit. Ziel des LLLs ist es, den Studierenden eine praxisnahe Auseinandersetzung mit der Planung, Durchführung und Reflexion von Lehr-Lernsituationen im Fach Physik zu ermöglichen.

Das Seminar ist in zwei Phasen gegliedert, die sich über insgesamt 14 Semesterwochen à 3 Stunden

erstrecken, und einem iterativen Ablauf folgen (Elsholz & Trefzger, 2017). In der ersten Phase, die bis zur neunten Semesterwoche geht, liegt der Schwerpunkt auf der eigenständigen Entwicklung und Ausgestaltung einer 30-minütigen Experimentierstation für Schulklassen. In der ersten Semesterwoche erhalten die Studierenden einen theoretischen Input zur Planung und Betreuung von Experimentierstationen. Unter anderem werden den Studierenden die Facetten experimenteller Kompetenz nach Nawrath et al. (2011), Grundlagen des forschend entdeckenden Lernens mit dem 5-E Modell (Bybee et al., 2006), der Mehrwert digitaler Medien nach dem SAMR-Modell (Puentedura, 2014) und das Vier-Phasen-Modell der Interessenentwicklung (Hidi & Renninger, 2006) nähergebracht. Auf diesen Konzepten aufbauend entwickeln die Studierenden ab der zweiten Semesterwoche eigenständig eine Station zu einem von den Dozierenden festgelegten Thema der Schulphysik und einer ausgewählten Jahrgangsstufe.

Eine zentrale didaktische Herausforderung für die Studierenden ist dabei, ihr selbst gewähltes Thema an das Vorwissen der SuS der jeweiligen Jahrgangsstufe anzupassen, ohne Inhalte vorwegzunehmen, die noch nicht behandelt wurden. Zusätzlich sollen die Experimente nicht aus dem Unterricht bekannt sein, sondern motivierend und neuartig sein. Dabei sollen die Materialien und Geräte der Physiksammlung verwendet werden. Unter Umständen können auch zusätzliche Materialien angeschafft werden. Die Studierenden sollen ausgehend von eigenen Ideen die Station entwickeln. Für Fragen und Hilfestellungen stehen die Dozierenden zur Verfügung.

In der zweiten Phase des LLLs werden die entwickelten Stationen praktisch mit drei Schulklassen am M!ND-Center der Universität Würzburg erprobt. Die SuS bearbeiten innerhalb eines Vormittags in Kleingruppen von sechs bis acht Personen die Stationen der Studierenden. Die drei Durchführungssitzungen sind jeweils durch eine Reflexionssitzung voneinander getrennt. Darin setzen sich die Studierenden vor dem Hintergrund theoretischer Unterrichtsmodelle mit ihren Erfahrungen aus den vergangenen Durchführungen auseinander (Damköhler et al., 2023) und nehmen gegebenenfalls Anpassungen an ihrer Station vor.

2.4. Der Experiment-Chatbot

Für das LLL wurde auf Basis des Sprachmodells GPT-4o ein Chatbot entwickelt, der die Studierenden während der Konzeption physikalischer Experimentierstationen begleitet. Zunächst besteht seine Aufgabe darin, gemeinsam mit den Studierenden ein geeignetes Thema zu finden, das den Kriterien des LLLs (siehe Kapitel 2.3) genügt. Aufbauend darauf oder anknüpfend an ein eigenes Thema hilft der Chatbot den Studierenden, eine Station mit Experimenten für SuS zu erstellen. Der Chatbot ist im Seminar stets zugänglich und kann die Studierenden somit gezielt individuell unterstützen, insbesondere, da die beiden

Dozierenden nicht alle Studierenden gleichzeitig betreuen können.

Die Idee, einen Chatbot im LLL einzusetzen, basiert auf Erfahrungen aus vorangegangenen Studien (Damköhler et al., 2024a; Damköhler et al., 2024b; Damköhler et al., 2025), in denen im vorangegangenen Semester ein Chatbot als Reflexionscoach in der zweiten Phase des LLLs eingesetzt wurde. Aufbauend auf diesen Studien soll der Chatbot in der vorliegenden Studie bereits in der ersten Phase des Seminars eingesetzt werden.

Dafür wurde ein Prompt verwendet, der durch Rollenzuweisung, strukturierte Ablaufpläne und umfassenden Materialien als Datengrundlage eine adaptive Kommunikation ermöglicht. Die schrittweise Gliederung des Prompts folgt dem Prinzip des Chain-of-Thought-Prompting, welches sich laut Wei et al. (2022) positiv auf die Qualität der Antworten auswirkt. Durch diese sequenzielle Struktur werden die Studierenden in einem iterativen Prozess durch die Ideenfindung und Ausarbeitung der Station geleitet. Zusätzlich kommt das Prinzip des Few-Shot-Promptings zum Einsatz: Dem Chatbot wurden dazu Beispiele von Stationen aus vorangegangenen Semestern gegeben. Laut Brown et al. (2020) wird dadurch die Qualität der Antwort des Chatbots gesteigert.

Um die Qualität des Outputs weiter zu erhöhen, kann der Chatbot auf eine Reihe zusätzlicher Materialien zurückgreifen. Dazu gehören ein digitalisierter Auszug aus den Inhalten des LehrplanPLUS (Staatsinstitut für Schulqualität und Bildungsforschung München, 2025), die Facetten der experimentellen Kompetenz (Nawrath et al., 2011), die Phasen der Motivation (Kircher, 2015), sowie eine Sammlung erprobter Experimente (Sächsischer Bildungsserver, o.D.; PhySX - Physikalische Schulexperimente Wiki, o.D.). Mithilfe dieser Materialien kann der Chatbot Vorschläge curricular einordnen, didaktisch besser fundieren und die Anforderungen an die Stationen besser umsetzen.

3. Forschungsfragen

In der vorliegenden Studie wird das TAM verwendet, um die Nutzungserfahrung von Lehramtsstudierenden der Physik mit einem KI-basierten Chatbot zu analysieren. Im Rahmen des behandelten theoretischen Hintergrunds ergeben sich folgende Forschungsfragen (FF):

FF1. Welches Nutzungsverhalten zeigen die Studierenden bei der Nutzung des Chatbots?

FF2. Wie erleben die Studierenden die Nutzung des Chatbots...

- a. hinsichtlich der wahrgenommenen Nützlichkeit?
- b. hinsichtlich der wahrgenommenen Benutzerfreundlichkeit?

FF3. Welche externen Variablen beeinflussen die Nutzungserfahrung der Studierenden?

4. Methodik

4.1. Erhebungsdesign und Durchführung der Interviewstudie

Im Rahmen des LLL-Seminars im Wintersemester 2024/25 nahmen sechs Lehramtsstudierende der Physik im höheren Fachsemester an der Studie teil. Die Studie bezieht sich ausschließlich auf die erste Phase des Seminars, in der die Studierenden eine 30-minütige Station zum Thema „Elektromagnetismus“ für die 10. Jahrgangsstufe konzipieren sollten. Diese erste Phase ging von Oktober bis Dezember 2024.

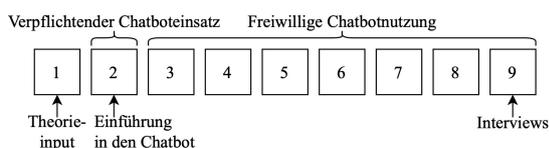


Abb. 2: Ablauf des Chatbot-Einsatzes und der Interviewstudie von Semesterwoche 1 bis 9. Eigene Darstellung.

Nachdem die Studierenden in der ersten Semesterwoche theoretische Inputs erhalten hatten (siehe Kapitel 2.3), wurden sie in der zweiten Semesterwoche in die Nutzung des Experiment-Chatbots eingeführt. Dabei wurden das Ziel des Chatbots, seine Funktionsweise und Tipps zur Kommunikation kurz erläutert. Der genaue Ablauf der Studie kann Abb. 2 entnommen werden.

Nach der Einführung erhielten die Studierenden jeweils einen Laptop mit einem Chatfenster, über das sie mit dem Chatbot, der auf dem Sprachmodell GPT-4o basiert, chatten konnten. Zunächst sollten sie mithilfe des Chatbots erste Ideen für eine Station entwickeln und diese weiter ausarbeiten. Dieser Einsatz war für alle Teilnehmenden verpflichtend, die Dauer der Nutzung blieb jedoch individuell offen. In den nachfolgenden Semesterwochen bis einschließlich der neunten wurde der Chatbot mit demselben Chat erneut bereitgestellt, die Nutzung blieb den Teilnehmenden jedoch überlassen. Parallel dazu konnten die Studierenden auch mit einem Dozierenden über ihre Station sprechen.

Zur Erhebung der Nutzungserfahrung wurde ein leitfadengestütztes Interview entwickelt, das sich an den zentralen Konstrukten des TAMs orientiert. Die Interviews wurden in der letzten Semesterwoche der Planungsphase durchgeführt. Die Teilnahme war freiwillig und unabhängig von der Bewertung.

4.2. Datenaufnahme und -auswertung

Die Gespräche wurden digital aufgezeichnet, mit MaxQDA automatisch transkribiert und anschließend händisch überarbeitet. Dabei kam das Transkriptionssystem mit sprachlicher Glättung nach Dresing & Pehl (2018) zum Einsatz. Alle Transkripte wurden

anonymisiert, so dass die Studierenden nur mit dem Kürzel B1 bis B6 bezeichnet werden.

Für die Auswertung der Interviews wurde eine qualitative Inhaltsanalyse nach Kuckartz & Rädiker (2022) herangezogen. Dabei kamen zwei Analyseformen zum Einsatz: die inhaltlich strukturierende Analyse (für FF1 und FF3) und die evaluative qualitative Analyse (FF2a und FF2b).

Die Hauptkategorien wurden in allen Fällen deduktiv aus dem TAM abgeleitet. Für FF1 wurden die Subkategorien deduktiv auf Basis des Interviewleitfadens entwickelt. Eine dieser Subkategorien wurde im weiteren Verlauf induktiv durch feinere Sub-Subkategorien ergänzt. Für FF2 und FF3 erfolgte die Bildung der Subkategorien vollständig induktiv aus dem Datenmaterial.

Das Erstellen der Transkripte und die erste Entwicklung des Kategoriensystems wurden zunächst eigenständig durchgeführt. Anschließend wurden die Kategorien innerhalb der Forschungsgruppe diskutiert und gemeinsam reflektiert.

4.3. Kategoriensystem

Die Hauptkategorien des entwickelten Kategoriensystems lauten in Anlehnung an die Hauptelemente des TAM: Nutzungsverhalten (FF1), Wahrgenommene Nützlichkeit (FF2a), Wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit (FF2b) und Externe Variablen (FF3). Jede dieser Hauptkategorien wurde durch Subkategorien weiter differenziert:

4.3.1. Nutzungsverhalten (FF1)

Zur Beschreibung des Umgangs der Studierenden mit dem Chatbot wurden drei Subkategorien gebildet: Nutzungszweck, Nutzungsart und Nutzungshäufigkeit.

Die Subkategorie Nutzungszweck wurde weiter in folgende Sub-Subkategorien untergliedert: Unterstützung bei der Ideen- und Themenfindung, Unterstützung bei der Ausarbeitung, Fachliche Hilfe, Didaktische Unterstützung, zukünftige Nutzung und Sonstiges.

4.3.2. Wahrgenommene Nützlichkeit (FF2a)

Die zweite Hauptkategorie umfasst die Einschätzung der Studierenden, wie sehr und in welcher Hinsicht der Chatbot bei der Arbeit im Seminar geholfen hat. Folgende Subkategorien wurden identifiziert: Unterstützung in der Ideenfindung*, Unterstützung in der Ideenausgestaltung*, Zeitersparnis durch den Chatbot*, Didaktische Unterstützung*, Lehrplanspezifische Unterstützung*, Fachliche Unterstützung*, Vergleich des Chatbots mit Dozierenden, Zukünftige Unterrichtsplanung*, Sonstiges.

Die mit Stern (*) gekennzeichneten Subkategorien wurden zusätzlich mit einer evaluativen Analyse untersucht. Zur Bewertung der Wahrnehmung wurde ein abgestuftes Ausprägungsschema verwendet: sehr negative Wahrnehmung, überwiegend negative

Wahrnehmung, gemischte Wahrnehmung, überwiegend positive Wahrnehmung, sehr positive Wahrnehmung sowie Wahrnehmung nicht klassifizierbar.

4.3.3. Wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit (FF2b)

Diese Hauptkategorie bezieht sich auf die Einschätzung, ob und in welcher Hinsicht die Arbeit mit dem Chatbot einfach oder schwierig war. Die Subkategorien lauten: Formulierung von Eingaben*, Benutzeroberfläche*, Darstellung und Umfang der Antworten*, Anpassungsfähigkeit und Präzision*, Sonstiges.

Auch in diesem Fall wurde für die mit Stern (*) versehenen Subkategorien eine evaluative Einschätzung anhand des oben beschriebenen Ausprägungsschemas vorgenommen.

4.3.4. Externe Variablen (FF3)

Zur Erfassung kontextueller oder individueller Einflussfaktoren auf die Nutzungserfahrung wurden folgende Subkategorien identifiziert:

Personenbezogene Merkmale, eigene Ideen zur Station, Vorwissen und Fachkompetenz, unterrichtsbezogene Erfahrung, Erfahrung mit der Nutzung von Chatbots, allgemeine Eigenschaften von Chatbots, organisatorische Rahmenbedingungen des Seminars, Verfügbarkeit von Ressourcen, didaktische und inhaltliche Vorgaben, externe Personen, individuelle Präferenzen und Interessen, individuelle Herangehensweise an die Stationsgestaltung, Vertrauen sowie Sonstiges.

5. Ergebnisse der Analyse

5.1. Nutzungsverhalten (FF1)

5.1.1. Nutzungszweck

Die Auswertung zeigt, dass der Chatbot von allen Studierenden für verschiedene Zwecke genutzt wurde. Ein zentrales Einsatzfeld war die Ideen- und Themenfindung „zur Inspiration [...] in welche Richtung es ungefähr gehen soll“ (B1). Auch bei der Ausarbeitung der Station, teils auf Grundlage eigener Ideen, teils auf Basis mit dem Chatbot entwickelter Ansätze, kam der Chatbot bei allen Studierenden zum Einsatz. Fünf der sechs Studierenden ließen sich bei fachlichen Fragen vom Chatbot helfen. Alle sechs berichteten, dass sie didaktische Unterstützung erhalten oder gesucht haben.

„Ich weiß auch nicht, ob der [Chatbot] dazu da ist, aber manchmal dachte ich mir so, ist das jetzt überhaupt interessant? Passt das zeitlich jetzt so? Sind es jetzt 30 Minuten? Ist das jetzt zu viel in diesen 30 Minuten? Ist das jetzt interessant gestaltet? Ist da ein roter Faden drin? Ja, solche Sachen habe ich ihn auch sehr viel gefragt.“ (B5)

Einzelne Studierende nannten auch andere Verwendungszwecke des Chatbots, etwa zur Erstellung von Grafiken oder als Programmierhilfe. Fünf Studierende äußerten zudem Überlegungen, wie sie einen

solchen Chatbot im Lehrberuf einsetzen könnten, hauptsächlich zur Inspiration bei der Unterrichtsplanung:

„Also ich denke auch später im Unterricht und so ist man eigentlich sehr dankbar, wenn man sich das Ganze ein bisschen verkürzen kann und Stunden-vorbereitungen einfach sich auf jeden Fall die Inspiration und schon mal so ein Grundkonstrukt durch die AI holt.“ (B1)

5.1.2. Nutzungsart

Auch die Art der Interaktion mit dem Chatbot unterschied sich deutlich. Einige Studierende formulierten präzise Anforderungen und forderten wiederholte Anpassungen der Vorschläge, während andere eher offen vorgingen und ihre Anfragen bewusst vage hielten.

„Ich habe einfach genau das geschrieben, wie ich den Aufbau von meinem Versuch haben will und da musste ich halt einen längeren Text schreiben, aber einfach, damit ich halt am Ende eine schöne Zusammenfassung habe.“ (B6)

Zwar wurden konkrete Prompttechniken nicht benannt, doch manche Studierende sprachen von solchen indirekt. Eine strategische Nutzung des Promptings war somit unterschiedlich stark ausgeprägt.

5.1.3. Nutzungshäufigkeit

Die Nutzung des Chatbots konzentrierte sich vor allem auf die ersten Semesterwochen des Seminars (siehe Abb. 3). In der zweiten Semesterwoche war der Einsatz noch verpflichtend, in der darauffolgenden Semesterwochen verwendeten alle Studierenden den Chatbot. Tendenziell nahm die Nutzung mit fortschreitender Konkretisierung deutlich ab. Nur ein Studierender gab an, den Chatbot „im Schnitt einmal pro Sitzung“ (B4) verwendet zu haben. B6 griff in späteren Semesterwochen noch einmal auf den Chatbot zurück. B5 konnte den Chatbot krankheitsbedingt seltener benutzen.

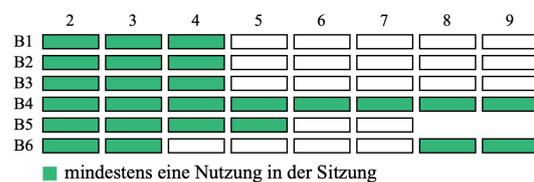


Abb. 3: Visualisierung der Nutzungshäufigkeit von der zweiten bis zur neunten Semesterwoche (Sitzung). Eine Nutzung wurde dann gezählt, wenn ein Teilnehmer erwähnte, dass der Chatbot in dieser Semesterwoche verwendet wurde, unabhängig von der Nutzungsdauer. Eigene Darstellung.

Die Studierenden wurden zudem gebeten, den Anteil der vom Chatbot beigetragenen Ideen im Vergleich zur Eigenarbeit bei ihrer finalen Station zu schätzen.

Tab. 1: Durch die Befragten wahrgenommene Gewichtung zwischen Chatbot-Unterstützung und Eigenleistung in Prozent.

Fall	B1	B2	B3	B4	B5	B6
Chatbot:Eigenleistung	50:50	25:75	65:35	30:70	50:50	20:80

Drei der sechs Studierenden schätzten die Eigenarbeit höher ein (siehe Tab. 1), zwei beschrieben eine gleichmäßige Aufteilung und eine Person gab an, dass der Chatbot den größeren Beitrag geleistet habe.

5.2. Wahrgenommene Nützlichkeit (FF2a)

Wie die detaillierte Übersicht in Tabelle 2 zeigt, nahm die Mehrheit der Studierenden den Chatbot bei der Konzeption der Station als überwiegend hilfreiches Werkzeug wahr.

Tab. 2: Evaluative Analyse der Wahrgenommenen Nützlichkeit. Legende: sehr negative Wahrnehmung (--), überwiegend negative Wahrnehmung (-), gemischte Wahrnehmung (+/-), überwiegend positive Wahrnehmung (+), sehr positive Wahrnehmung (++) , Wahrnehmung nicht klassifizierbar (n.k.).

Subkategorie	B1	B2	B3	B4	B5	B6
Unterstützung in der Ideenfindung	+	+	+	+/-	+/-	++
Unterstützung in der Ideenausgestaltung	n.k.	+	++	+/-	++	++
Zeitersparnis durch den Chatbot	++	+	++	++	++	++
Didaktische Unterstützung	-	+	+	-	++	+
Lehrplanspezifische Unterstützung	++	+/-	+	+/-	+/-	+
Fachliche Unterstützung	++	+	++	+	++	+
Zukünftige Unterrichtsplanung	+	+	+	-	+/-	+/-

Bei näherer Betrachtung zeigen sich jedoch Diskrepanzen, sowohl zwischen den Teilnehmenden als auch zwischen den Subkategorien. So nimmt beispielsweise B3 alle Facetten der Nützlichkeit überwiegend positiv bis sehr positiv wahr, während andere (z.B. B4 und B5) kritischere Einschätzungen äußern.

Besonders positiv bewertet wurden die Zeitersparnis und die fachliche Unterstützung durch den Chatbot. Ein Studierender äußerte sich zur Zeitersparnis wie folgt:

„In gewisser Weise ja [...] Also, um erst mal in so eine Ideenfindung dann noch mal zu kommen, hätte man ja dann erst mal viel recherchieren müssen. Oder auch, wenn man physikalisch mal stehen geblieben ist. Auch da habe ich ja vorhin schon erwähnt, dass es recht hilfreich war.“ (B4)

In anderen Subkategorien, wie etwa der didaktischen Unterstützung, fällt das Bild negativer aus. Hier wurden sowohl nützliche Impulse durch den Chatbot als auch eine begrenzte Passgenauigkeit der Vorschläge benannt. Auch in Bezug auf Vorstellungen zur zukünftigen Nutzung von Chatbots für die spätere Unterrichtsplanung äußerten sich die Studierenden differenziert. Zwar wurden Potenziale für den Einsatz in der Unterrichtsplanung erkannt, gleichzeitig wurden aber auch Einschränkungen des Chatbots bezüglich

der Anpassungsfähigkeit an individuelle Situationen genannt.

Auch in Hinblick auf die Frage zu Vor- und Nachteilen des Chatbots gegenüber der Betreuung durch einen Dozierenden, ergibt sich ein differenziertes Bild. Ein zentraler Vorteil des Chatbots liegt in seiner ständigen Verfügbarkeit. Gleichzeitig heben viele Studierende die größere Tiefe und Präzision der Rückmeldung von Dozierenden hervor, insbesondere aufgrund deren schulpraktischer Erfahrung. Ein Studierender berichtete dies folgendermaßen:

„Also ich finde es gut, dass sie [die Dozierenden] eher so für das Physikalische da sind und wenn man da wirklich Nachfragen hat zu den Versuchen. Aber ich kann halt dem Chatbot halt unendlich viele Fragen stellen und auch egal wie nervig die sind und egal wie oft und ja, genau. [...] Also ich finde die ergänzen sich sehr gut.“ (B5)

5.3. Wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit (FF2b)

Auch in Bezug auf die WB zeigt sich insgesamt ein überwiegend positives Bild. Tabelle 3 bietet eine detaillierte Übersicht der einzelnen Subkategorien. Dabei lassen sich zwei Tendenzen erkennen: Die eine Seite bewertet die Benutzerfreundlichkeit als durchweg positiv (B2, B3), während die andere ihr deutlich kritischer gegenübersteht (B1, B5, B6).

Tab. 3: Evaluative Analyse der Wahrgenommenen Benutzerfreundlichkeit. Legende: sehr negative Wahrnehmung (--), überwiegend negative Wahrnehmung (-), gemischte Wahrnehmung (+/-), überwiegend positive Wahrnehmung (+), sehr positive Wahrnehmung (++) , Wahrnehmung nicht klassifizierbar (n.k.).

Subkategorie	B1	B2	B3	B4	B5	B6
Formulierung von Eingaben	+	++	+	+/-	-	++
Benutzeroberfläche	++	+	+	++	++	-
Darstellung und Umfang der Antworten	-	++	++	n.k.	-	n.k.
Anpassungsfähigkeit und Präzision	+	+	++	+/-	+/-	++

Die Formulierung von Eingaben wurde von vielen Teilnehmenden als intuitiv und problemlos beschrieben. Das gilt ebenso für die Benutzeroberfläche von ChatGPT, über die sie mit dem Chatbot kommunizierten. Gleichzeitig wurde angemerkt, dass längere Chatverläufe unübersichtlich werden können, sodass ältere Nachrichten nur schwer auffindbar sind.

Die Anpassungsfähigkeit und Präzision der Antworten wurden meist positiv wahrgenommen. Falls die Antworten nicht den Vorstellungen der Nutzenden entsprachen, wussten sich die Studierenden durch gezielte Rückfragen oder Umformulierungen zu helfen.

Am unterschiedlichsten fiel die Wahrnehmung der Darstellung und des Umfangs der Antworten aus. Während B2 die Gliederung der Antworten lobte und B3 den knappen Umfang der Antworten als hilfreich empfand, kritisierten andere genau diese Punkte. B1 erschienen die Antworten zu knapp, zudem wurde der

strukturelle Aufbau der Nachrichten negativ wahrgenommen. B5 empfand die Nachrichten als zu umfangreich.

5.4. Externe Variablen (FF3)

Im Rahmen des Interviews wurden zahlreiche externe Einflussfaktoren benannt, die den definierten Subkategorien zugeordnet wurden. Die genannten Variablen erstrecken sich dabei von personenbezogenen Merkmalen und individuellen Vorerfahrungen bis hin zu organisatorischen Rahmenbedingungen.

Alle Studierenden thematisierten ihr eigenes fachliches Vorwissen. So schilderte eine Person:

„Aber wenn man mal so physikalische Fragen hatte und sich jetzt nicht ganz klar war, auf was für ein Konzept/ also wieso sowas funktioniert, [...] dann habe ich auch manchmal den Chatbot gefragt und die Antworten fand ich eigentlich ganz gut, um drüber nachzudenken in der Richtung.“ (B4)

Die Erfahrungen, die mit der Nutzung von Chatbots außerhalb des Seminars gemacht wurden, variierten stark. Während B6 beispielsweise in einem früheren Seminar eine Einführung in Prompttechniken erhalten hat, hat B4 vor dem Seminar noch nie mit einem Chatbot gearbeitet.

Ähnlich unterschiedlich waren die unterrichtlichen Vorerfahrungen. B1 hatte bereits Teilzeit als Physiklehrkraft gearbeitet, B2 und B6 hatten hingegen noch keine Lehrerfahrung im Physikunterricht gesammelt.

Auch die individuellen Herangehensweisen an die Stationsgestaltung prägten die Aussagen der Studierenden. So war es für B3 beispielsweise wichtig, „neue Themen zu finden [...] was halt mal so out of the box ist“ (B3). B4 wollte sich dagegen lieber enger am Lehrplan orientieren.

Darüber hinaus spielte die Verfügbarkeit von Ressourcen für die Studierenden eine Rolle. Einige merkten dabei die ständige Verfügbarkeit des Chatbots an. Gleichzeitig bemängelte B6, dass für eine vergleichbare Nutzung außerhalb des Seminars die kostenpflichtige ChatGPT-Plus-Version erforderlich sei.

6. Diskussion

Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass die Studierenden den Chatbot vielseitig genutzt haben. Sowohl aus den Aussagen zur zukünftigen Nutzung als auch aus der beobachteten zeitlichen Verteilung wird deutlich, dass die Studierenden das größte Potenzial eines solchen Chatbots als Inspirationsquelle und zur Ausarbeitung erster Ansätze sehen. Mit zunehmender Praxisarbeit bei der Stationsausgestaltung wurde der Chatbot weniger verwendet und es wurden andere Vorgehensweisen gewählt (z.B. Unterstützung durch Dozierende oder Eigenarbeit).

Die WN, die laut dem TAM das Nutzungsverhalten maßgeblich beeinflusst, wurde überwiegend positiv bewertet. Dabei berichten die Studierenden besonders häufig von einer Zeitersparnis durch den Chatbot.

Inwiefern diese empfundene Zeitersparnis objektiv messbar ist, bleibt offen und könnte Gegenstand zukünftiger Studien sein. Dass die Studierenden die didaktische Unterstützung deutlich negativer empfinden, mag am Systemprompt des Chatbots liegen. Zwar basiert der Chatbot auf didaktischen Prinzipien, er war jedoch nicht explizit darauf ausgelegt, vertiefte didaktische Rückfragen zu beantworten.

Auch die Benutzerfreundlichkeit des Chatbots fiel den Studierenden überwiegend positiv auf, wies dabei aber ähnliche Auffälligkeiten wie die WN auf. Teilnehmende, die den Chatbot als weniger nützlich empfanden, bewerteten seine Benutzerfreundlichkeit ähnlich. Dieser Befund ist im Sinne des TAM plausibel, da die WB als direkter Prädiktor für die WN gilt.

Allgemein lassen sich die beobachteten Diskrepanzen in den Bewertungen zwischen den Studierenden sowie zwischen den einzelnen Subkategorien durch die identifizierten EV erklären. Personenspezifische Variablen wie Vorerfahrungen mit Chatbots können für intraindividuelle Unterschiede in der Bewertung einzelner Subkategorien verantwortlich sein. Dagegen können für die unterschiedliche Bewertung von Subkategorien EV verantwortlich sein, welche Rahmenbedingungen außerhalb des Einflusses der Studierenden umfassen. Dazu zählt auch die bereits angesprochene Priorisierung von Funktionen im Systemprompt des Chatbots.

Beim Vergleich mit der Betreuung durch die Dozierenden wurde der Chatbot von vielen als hilfreiche und jederzeit verfügbare Ergänzung wahrgenommen, jedoch nicht als Ersatz für die Dozierenden. Die persönliche Expertise der Lehrperson schien für die Studierenden unersetzbar zu sein. Auch Damköhler et al. (2025) stellten fest, dass ein Großteil der Studierenden einen Chatbot in der Reflexionsphase nicht als Person wahrnimmt. Eine hybride Lernumgebung, in der ein KI-Werkzeug mit menschlicher Unterstützung kombiniert wird, scheint demnach vielversprechend zu sein.

Die Vielzahl identifizierter EV zeigt, wie vielschichtig und komplex die Einflüsse auf die WN und WB bei der Nutzung eines Chatbots sein können. Durch die Identifikation der EV kann der Chatbot besser an die Bedürfnisse der Studierenden angepasst werden. Insofern liefert diese Studie wichtige Impulse für die vielfach geforderte Förderung von KI-Kompetenz. Eine gezielte Anpassung zukünftiger Chatbots kann zu einer frühzeitig positiven Nutzungserfahrung mit KI bei angehenden Lehrkräften führen.

Limitationen

Bei der Interpretation der Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass der Chatbot ausschließlich während der Seminarsitzungen zugänglich war. Dadurch können die WB, WN und das Nutzungsverhalten potenziell negativ beeinflusst werden. Darüber hinaus handelt es sich um ein spezifisches fachdidaktisches Setting im Physik-Lehramtsstudium, dessen Ergebnisse nicht ohne Weiteres auf andere Einsatzbereiche der

Lehrkräftebildung übertragbar sind. Ein weiterer limitierender Faktor ist, dass kein Vergleich zu einer Kontrollgruppe, die ohne Chatbot-Unterstützung gearbeitet hat, vorgenommen wurde. Dadurch bleibt beispielsweise offen, wie groß der tatsächliche Effizienzzuwachs durch den Chatbot ist. Schließlich ist die Stichprobe mit sechs Teilnehmenden klein, sodass keine Sättigung bei den identifizierten Sub- und Subkategorien zu erwarten ist.

7. Ausblick

Zukünftige Studien könnten den Chatbot auf Basis der Ergebnisse weiterentwickeln und gezielt zur Förderung von KI-Kompetenz in der Lehrkräftebildung einsetzen. Eine API-basierte Lösung würde eine flexiblere Nutzung auch außerhalb des Seminars ermöglichen. Zudem wäre die Messung des Effizienzgewinns durch eine Kontrollgruppe förderlich. Darüber hinaus können weiterführende quantitative Erhebungen dazu beitragen, die Wirkung der identifizierten EV auf die WN und WB systematisch zu untersuchen.

8. Literatur

- Ali, I., Warraich, N. F., & Butt, K. (2024). Acceptance and use of artificial intelligence and AI-based applications in education: A meta-analysis and future direction. *Information Development*, 02666669241257206. <https://doi.org/10.1177/02666669241257206>
- Beldad, A. D., & Hegner, S. M. (2018). Expanding the Technology Acceptance Model with the Inclusion of Trust, Social Influence, and Health Valuation to Determine the Predictors of German Users' Willingness to Continue using a Fitness App: A Structural Equation Modeling Approach. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 34(9), 882–893. <https://doi.org/10.1080/10447318.2017.1403220>
- Brown, T. B., Mann, B., Ryder, N., Subbiah, M., Kaplan, J., Dhariwal, P., Neelakantan, A., Shyam, P., Sastry, G., Askell, A., Agarwal, S., Herbert-Voss, A., Krueger, G., Henighan, T., Child, R., Ramesh, A., Ziegler, D. M., Wu, J., Winter, C., ... Amodei, D. (2020). Language Models are Few-Shot Learners. Curran Associates Inc., 1877–1901.
- Bybee, R. W., Taylor, J. A., Gardner, A., Van Scooter, P., Powell, J. C., Westbrook, A., & Landes, N. (2006). The BSCS 5E Instructional Model: Origins, Effectiveness, and Applications. BSCS.
- Damköhler, J., Elsholz, M., & Trefzger, T. (2023). Förderung der Reflexionskompetenz im Lehr-Lern-Labor: Unterstützung der Entwicklung der Reflexionskompetenz Studierender in einem Lehr-Lern-Labor-Seminar. *PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung 2023*, 195–198.
- Damköhler, J., Lutz, W., & Trefzger, T. (2024a). Das Würzburger KI-Projekt: ChatGPT als Reflexionscoach im Lehr-Lern-Labor-Seminar Physik (J. Huwer, S. Becker-Genschow, C. Thyssen, A. Finger, L. von Kotzebue, E. Krenser, M. Meier, & T. Bruckermann, Hrsg.; 1. Aufl., S. 70–73). Waxmann.
- Damköhler, J., Lutz, W., & Trefzger, T. (2024b). Der digitale Dozent: ChatGPT als Co-Pilot in der Lehrpersonenbildung. *PhyDid B - Didaktik Der Physik - Beiträge Zur DPG-Frühjahrstagung 2024*, 1(1). <https://ojs.dpg-physik.de/index.php/phydid-b/article/view/1412>
- Damköhler, J., Lutz, W., & Trefzger, T. (2025). ChatGPT als Reflexionscoach. Einblicke in das Würzburger Lehr-Lern-Labor. In H. van Horst (Hrsg.), *Entdecken, lehren und forschen im Schülerlabor. Jahrestagung der Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik in Bochum 2024*. Im Druck.
- Davis, F. D., Bagozzi, R. P., & Warshaw, P. R. (1989). User Acceptance of Computer Technology: A Comparison of Two Theoretical Models. *Management Science*, 35(8), 982–1003.
- Davis, F. D., & Granić, A. (2024). *The Technology Acceptance Model: 30 Years of TAM*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-45274-2>
- Dresing, T., & Pehl, T. (2018). *Praxisbuch Interview, Transkription & Analyse: Anleitungen und Regelsysteme für qualitativ Forschende* (8. Auflage). Eigenverlag.
- Elsholz, M., & Trefzger, T. (2017). Professionalisierung durch Praxisbezug – Begleitforschung zu den Würzburger Lehr-Lern-Laboren. *Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik Jahrestagung in Zürich 2016*. In C. Maurer (Hrsg.), *Implementation fachdidaktischer Innovation im Spiegel von Forschung und Praxis* (S. 488–491). Universität Regensburg.
- Granić, A., & Marangunić, N. (2019). Technology acceptance model in educational context: A systematic literature review. *British Journal of Educational Technology*, 50(5), 2572–2593. <https://doi.org/10.1111/bjet.12864>
- Hidi, S., & Renninger, K. A. (2006). The Four-Phase Model of Interest Development. *Educational Psychologist*, 41(2), 111–127. https://doi.org/10.1207/s15326985ep4102_4
- Huwer, J., Becker-Genschow, S., Thyssen, C., & Thoms, L.-J. (2024). Kompetenzen für den Unterricht mit und über Künstliche Intelligenz.
- Jackson, C. M., Chow, S., & Leitch, R. A. (1997). Toward an Understanding of the Behavioral Intention to Use an Information System. *Decision Sciences*, 28(2), 357–389. <https://doi.org/10.1111/j.1540-5915.1997.tb01315.x>
- King, W. R., & He, J. (2006). A meta-analysis of the technology acceptance model. *Information &*

- Management, 43(6), 740–755.
<https://doi.org/10.1016/j.im.2006.05.003>
- Kircher, E. (2015). Methoden im Physikunterricht. In E. Kircher, R. Girwidz, & P. Häußler (Hrsg.), *Physikdidaktik: Theorie und Praxis* (3. Aufl., S. 141–192). Springer.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-41745-0_5
- KMK (Kultusministerkonferenz). (2021). Handlungsempfehlung für die Bildungsverwaltung zum Umgang mit Künstlicher Intelligenz in schulischen Bildungsprozessen.
https://www.kmk.org/fileadmin/veroeffentlichungen_beschluesse/2024/2024_10_10-Handlungsempfehlung-KI.pdf
- Knoth, S., & Haider, M. (2023). Digitale Kompetenzen und Technologieakzeptanz bei angehenden Grundschullehrkräften. *Merz | Medien + Erziehung*, 67(3), 70–77.
<https://doi.org/10.21240/merz/2023.3.16>
- Kuckartz, U., & Rädiker, S. (2022). *Qualitative Inhaltsanalyse. Methoden, Praxis, Computerunterstützung* (5. Aufl.). Beltz Juventa.
- Lutz, W., Damköhler, J., & Trefzger, T. (2025). Künstliche Intelligenz. Akzeptanz und AI-Literacy unter Lehramtsstudierenden. In H. van Horst (Hrsg.), *Entdecken, lehren und forschen im Schülerlabor. Jahrestagung der Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik in Bochum 2024*. Im Druck.
- Ma, Q., & Liu, L. (2004). The Technology Acceptance Model: A Meta-Analysis of Empirical Findings. *Journal of Organizational and End User Computing*, 16(1), 59–72.
<http://dx.doi.org/10.4018/978-1-59140-474-3.ch006>
- Marineau, K. (2023, April 20). What is generative AI? IBM. <https://research.ibm.com/blog/what-is-generative-ai>
- Nawrath, D., Maiseyenko, V., & Schecker, H. (2011). Experimentelle Kompetenz: Ein Modell für die Unterrichtspraxis. *Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule*, 60, 42–48.
- PhySX - Physikalische Schulexperimente Wiki. (o. J.). Abgerufen 27. März 2025, von <https://www.physikalische-schulexperimente.de/physo/Hauptseite>
- Puentedura, R. R. (2014, Dezember 10). SAMR, learning and assessment. *rrpweblog*.
<http://www.hippasus.com/rrpweblog/archives/2014/11/28/SAMRLearningAssessment.pdf>
- Sächsischer Bildungsserver. (o. J.). Experimente für den Physikunterricht. Abgerufen 27. März 2025, von <https://www.sachsen.schule/~physik/experi.php>
- Scherer, R., Siddiq, F., & Tondeur, J. (2019). The technology acceptance model (TAM): A meta-analytic structural equation modeling approach to explaining teachers' adoption of digital technology in education. *Computers & Education*, 128, 13–35. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2018.09.009>
- Staatsinstitut für Schulqualität und Bildungsforschung München. (2025). *LehrplanPLUS - Gymnasium—Fachlehrpläne*. https://www.lehrplanplus.bayern.de/schulart/gymnasium/inhalt/fachlehrplaene?w_schulart=gymnasium&wt_1=schulart&w_fach=physik&wt_2=fach
- Svendsen, G. B., Johnsen, J.-A. K., Almås-Sørensen, A.-S., & Vittersø, J. (2013). Personality and technology acceptance: The influence of personality factors on the core constructs of the Technology Acceptance Model. *Behaviour & Information Technology*, 32(4), 323–334.
<https://doi.org/10.1080/0144929X.2011.553740>
- Venkatesh, V., & Davis, F. D. (2000). A Theoretical Extension of the Technology Acceptance Model: Four Longitudinal Field Studies. *Management Science*, 46(2), 186–204.
- Venkatesh, V., Morris, M. G., Davis, G. B., & Davis, F. D. (2003). User Acceptance of Information Technology: Toward a Unified View. *MIS Quarterly*, 27(3), 425–478.
<https://doi.org/10.2307/30036540>
- Vo, G. M., & Pancratz, N. (2023, September 20). Vorstellungen von Lehramtsstudierenden zu künstlicher Intelligenz. *INFOS 2023 - Informatikunterricht zwischen Aktualität und Zeitlosigkeit*. <https://doi.org/10.18420/infos2023-005>
- von Garrel, J., & Mayer, J. (2025). *Künstliche Intelligenz im Studium—Eine quantitative Längsschnittstudie zur Nutzung KI-basierter Tools durch Studierende [Application/pdf]*. Hochschule Darmstadt.
https://doi.org/10.48444/H_DOCS-PUB-533
- Wang, S., Wang, F., Zhu, Z., Wang, J., Tran, T., & Du, Z. (2024). Artificial intelligence in education: A systematic literature review. *Expert Systems with Applications*, 252, 124167.
<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.124167>
- Wei, J., Wang, X., Schuurmans, D., Bosma, M., Ichter, B., Xia, F., Chi, E., Le, Q., & Zhou, D. (2022). Chain-of-Thought Prompting Elicits Reasoning in Large Language Models. *Curran Associates Inc.*, 24824–24837.
- Weizenbaum, J. (1976). *Computer Power and Human Reason: From Judgment to Calculation*. W H Freeman.
- Zawacki-Richter, O., Marín, V. I., Bond, M., & Gouverneur, F. (2019). Systematic review of research on artificial intelligence applications in higher education – where are the educators? *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, 16(1), 39.
<https://doi.org/10.1186/s41239-019-0171-0>

Der ESP32 im Kontext MINT-Bereich

Kristina Holmann, Angela Fösel

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Department Physik, Didaktik der Physik
Stadttstraße 7, 91058 Erlangen
angela.foesel@fau.de

Kurzfassung

Der ESP32 ist ein beliebter Mikrocontroller in der Welt der Elektronik und des Internet of Things (IoT). Für den Einsatz im Physik- und Technikunterricht ist er hervorragend geeignet: Er verfügt über eine Vielzahl an intern verbauten Sensoren, und bei fast allen Modellen bietet der ESP32 Bluetooth /Bluetooth Low Energy (BLE) Konnektivität. Im Beitrag wird der ESP32 mit Blick auf den Einsatz im MINT-Unterricht charakterisiert. Der Fokus liegt hierbei auf der Nutzung der Sensoren sowie auf dem Einsatz eines modernen, modular aufgebauten, computergestützten Messwerterfassungssystems mit Option auf BLE-Konnektivität. Für die Praxis relevante Unterschiede gegenüber dem Mikrocontroller-Board „Arduino“ sowie dem Mini-PC „Raspberry Pi“ werden kurz charakterisiert und diskutiert. Exemplarisch werden zwei kreative schülerrelevante Projekte vorgestellt, die auf einem ESP32 basieren und eindrücklich zeigen, dass der ESP32 den MINT-Unterricht um digitale Medien bereichert und zugleich spielerisch zu einem kompetenzorientierten Unterricht einlädt. In einem ersten Projekt werden mit dem ESP32-CAM-Modul Objekte in einem Live-Stream erkannt und identifiziert, indem die Bilddaten analysiert und interpretiert werden. Im zweiten Projekt wird ein Anemometer in Kombination mit dem im ESP32 integrierten Hall-Sensor eingesetzt, um die Windgeschwindigkeit zu messen.

1. Motivation für den Einsatz des ESP32 im MINT-Bereich

Der Mikrocontroller ESP32 ist ein vielseitiges digitales Werkzeug, das eine fundierte Basis für einen praxisnahen, interaktiven und sinnstiftenden MINT-Unterricht (Mathematik, Informatik, Naturwissenschaften und Technik) bietet [1]. Laut der Sinus-Studie 2024 [2] fördert ein solcher Unterricht das nachhaltige Interesse an Technik und Naturwissenschaften bei Schülerinnen und Schülern – eine der zentralen Ziele des MINT-Unterrichts.

Der Mikrocontroller beweist sich durch seine interdisziplinären Einsatzmöglichkeiten und unterstützt damit gleichzeitig den Erwerb fachlicher Kompetenzen sowie die Entwicklung eines vernetzten Denkens bei den Lernenden.

Beim Arbeiten mit dem Mikrocontroller im naturwissenschaftlichen Unterricht ermöglicht der ESP32 die Vermittlung grundlegender Programmier- und Sensorikkenntnisse sowie den Erwerb von Kompetenzen im Bereich der Erkenntnisgewinnung. Beispielsweise wird im Physikunterricht die ErkenntnisKompetenz durch das eigenständige Planen, Durchführen und Auswerten von Experimenten gestärkt, wodurch ein forschender Lernansatz bei Schülerinnen und Schülern gefördert wird.

Ein weiterer Vorteil des ESP32 ist seine Funktion als kosteneffiziente Alternative zu traditionellen Messwerterfassungssystemen wie CASSY. Aufgrund seiner geringen Anschaffungskosten ist eine

flächendeckende Ausstattung ganzer Klassen möglich, was den Einsatz im Unterricht auf breiter Basis unterstützt. Dies erleichtert den Zugang zu digitalen Mess- und Steuerungstechnologien und schafft gleiche Lernbedingungen für alle Schülerinnen und Schüler.

2. Charakterisierung des ESP32 - ein Überblick

Der Mikrocontroller ESP32 ist in verschiedenen Versionen erhältlich. Die hier verwendete Variante, der ESP32-Wroom-32D, sticht hervor durch bereits integrierte Sensoren. Dazu zählen ein Hall-Sensor sowie kapazitive Touch-Sensoren [3]. Zusätzlich zu den integrierten Sensoren können externe Sensoren an den ESP32 angeschlossen werden wie zum Beispiel ein Temperatursensor. Diese Sensoren ermöglichen eine Erfassung physikalischer Größen oder Zustände der Umgebung und erweitern die Einsatzmöglichkeiten des Mikrocontrollers erheblich.

Diese Sensoren müssen über eine integrierte Entwicklungsumgebung (IDE) angesteuert werden, wobei die spezifischen Messparameter (wie Messbereich oder Abtastrate) direkt im Quellcode definiert werden. Dieser Code wird in Programmiersprachen wie C++ oder MicroPython verfasst und auf den Mikrocontroller hochgeladen. Details zu Hard- und Software des ESP32 sowie ein Einstieg in die Programmierung mit MicroPython und C++ bietet Brands Werk Mikrocontroller ESP32 – Das umfassende Handbuch [4].

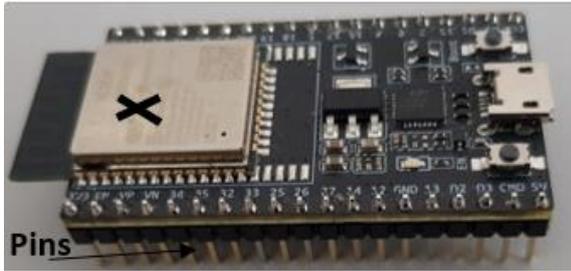


Abb. 1: ESP32-Wroom-32D mit integriertem Hall-Sensor (schwarzes Kreuz) unter der Metallbeschichtung und den integrierten Touch-Sensoren, die sich unter folgenden Pinbelegungen befinden: 0, 2, 4, 13, 12, 14, 27, 32, 33. (Pins als kleine, graue Metallkontakte sichtbar, die auf der Seite oder Unterseite des Mikrocontrollers angeordnet sind). Keine externen Sensoren angeschlossen. Eigene Darstellung.

Das Auslesen der Sensoren bezieht sich auf den Vorgang, bei dem die von den Sensoren erfassten Daten in eine lesbare und weiter verarbeitbare Form überführt werden. Die erfassten Messwerte können in Echtzeit angezeigt, aufgezeichnet oder für weitere Analysen verarbeitet werden.

Neben den Sensormöglichkeiten bietet der ESP32 weitere zentrale Funktionen wie integrierte WLAN- und Bluetooth-Schnittstellen. Insbesondere die Bluetooth-Funktion ermöglicht eine drahtlose Kommunikation mit externen Geräten, was den Anwendungsbereich des Mikrocontrollers erheblich erweitert. Für einen einsteigerfreundlichen und praxisnahen Zugang zum ESP32 ist das Werk von Bartmann [5] empfehlenswert.

3. ESP32 in Abgrenzung zu Arduino & Raspberry Pi

Die größte Stärke des ESP32 im Vergleich zu Arduino oder Raspberry Pi liegt in seiner flexiblen Programmierbarkeit (vgl. Tabelle 1).

Tab. 1: Drei Mikrocontroller im Vergleich hinsichtlich ihrer Programmiermöglichkeiten zur Ansteuerung der an sie angeschlossenen bzw. integrierten Sensoren.

Programmierung		
ESP32	Arduino	Raspberry PI
C++ MicroPython	C++	Python Linux OS

Nutzerinnen und Nutzer, die bereits mit Arduino oder Raspberry Pi vertraut sind, finden schnell Zugang zum ESP32, da die Sensoren sowohl mit C++ als auch mit MicroPython angesteuert und ausgelesen werden können (vgl. Tabelle 1). MicroPython ist dabei eine speziell für Mikrocontroller optimierte Version der Programmiersprache Python und deshalb von der Syntax sehr ähnlich [4]. Für Einsteiger und Einsteigerinnen bietet die Arduino IDE eine benutzerfreundliche grafische Oberfläche, die durch zahlreiche

Codebeispiele einen besonders leichten Einstieg ermöglicht. Im Gegensatz dazu setzt die Nutzung eines Raspberry Pi häufig komplexere Setups voraus, beispielsweise die Installation eines Betriebssystems oder spezifischer Treiber. Der ESP32 bietet darüber hinaus eine steile Lernkurve: Lernende können sich von blockbasierter Programmierung über C++ bis hin zur skriptbasierten Entwicklung in MicroPython weiterentwickeln und dabei ihre Programmierfähigkeiten schrittweise ausbauen. Dank dieser Vielseitigkeit bietet der ESP32 deutlich mehr Gestaltungsspielraum für differenzierte Aufgabenstellungen im MINT-Unterricht – unabhängig vom Erfahrungsniveau der Lernenden.

4. Interner Hall-Sensor

4.1. Funktionsüberprüfung des internen Hall-Sensors mit einem experimentellen Setup.

Der interne Hall-Sensor des ESP32 ist für die Messung der magnetischen Flussdichte ausgelegt [6] und befindet sich unter der Metallbeschichtung des Mikrocontrollers (vgl. Abbildung 1). Es wurde ein Experiment konzipiert, bei dem ein Neodym-Magnet ($B = 437 \text{ mT}$) direkt auf den Hall-Sensor unter der Metallbeschichtung des ESP32 positioniert wurde. Der Magnet wurde dabei einmal mit dem Nordpol und einmal mit dem Südpol auf den Sensor gelegt – jeweils unter denselben Bedingungen und an derselben Position. Ziel des Experiments war es, die Funktionalität des integrierten Hall-Sensors zu überprüfen und festzustellen, ob er wie erwartet in der Lage ist, die magnetische Flussdichte des Neodym-Magneten in mT zu erfassen.

4.2. Auswertung der Funktionsüberprüfung

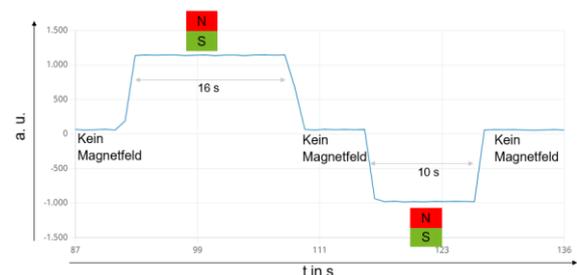


Abb. 2: „Magnetische Flussdichte“ in Abhängigkeit von der Zeit. Eigene Darstellung.

Die aufgezeichneten Messwerte sind in einem Graphen (vgl. Abbildung 2) dargestellt. Während die x-Achse die Zeit in Sekunden (s) angibt, wurde die y-Achse mit willkürlichen Einheiten (arbitrary units, a.u.) versehen. Die Wahl dieser Einheiten wird dadurch begründet, dass keine eindeutige Kalibrierung des Hall-Sensors zur Messung der magnetischen Flussdichte in Millitesla (mT) vorlag.

Wird der Neodym-Magnet mit dem Südpol nach unten auf den Hall-Sensor platziert, registriert der Sensor Messwerte im Bereich von +1000 bis +1100 a.u. Wird der Magnet umgekehrt (Nordpol nach unten) positioniert, liegen die Messwerte bei etwa -1000 a.u.

Ohne Magnet erkennt der Sensor kein magnetisches Feld, wobei ein Offset von 100 a.u. sich einstellt.

Zusammenfassend zeigt die Funktionsüberprüfung, dass der Hall-Sensor des ESP32 in der Lage ist, Nord- und Südpol eines Magneten zu unterscheiden. Er registriert Magnetfelder zuverlässig und kann somit als logischer Schaltmechanismus verwendet werden.

4.3. Didaktische Erkenntnis für den MINT-Unterricht

Der Hall-Sensor des ESP32 ist für eine präzise Messung der magnetischen Flussdichte ungeeignet und kann hinsichtlich Genauigkeit und Messbereich nicht mit professionellen Sensoren wie denen des CASSY-Systems konkurrieren. Statt exakter Messwerte liefert der Sensor lediglich eine qualitative Aussage: Er zeigt an, ob ein Magnetfeld erkannt wird (Ja/Nein).

Darüber hinaus muss das Magnetfeld eine ausreichende Stärke aufweisen, um vom Sensor überhaupt erfasst zu werden [4]. Diese Eigenschaften begrenzen den Einsatz des Hall-Sensors auf qualitative Experimente, eignen sich jedoch gut zur Vermittlung grundlegender Prinzipien der Magnetfeldmessung und als Schaltmechanismus.

5. Bluetooth Funktion des ESP32 in Verbindung mit der Phyphox-App

Die Bluetooth-Funktion des ESP32 bietet im schulischen Kontext erhebliche Vorteile, insbesondere an Schulen mit begrenzter Ausstattung an Laptops oder PCs. Sie ermöglicht eine drahtlose Verbindung zu mobilen Endgeräten wie Smartphones oder Tablets und erweitert damit die Möglichkeiten für interaktive und praxisnahe Experimente.

Ein besonders praxisnaher Anwendungsfall ist die Nutzung der Phyphox-Bibliothek [7]. Über die Bluetooth-Schnittstelle des ESP32 können Messdaten externer Sensoren in Echtzeit auf ein Smartphone übertragen und dort direkt in der Phyphox-App visualisiert werden. Zur Veranschaulichung wurde ein Abstandssensor mit dem ESP32 verbunden, dessen Messwerte über die Phyphox-App grafisch dargestellt wurden.



Abb. 3: Abstand in Abhängigkeit der Zeit; Weg-Zeit-Diagramm. Eigene Darstellung. Eigene Darstellung.

Der resultierende Graph zeigt den Abstand in Zentimetern (cm) in Abhängigkeit von der Zeit (s) und ermöglicht eine unmittelbare Analyse des Messverlaufs.

Darüber hinaus bietet die Phyphox-App die Möglichkeit, die aufgezeichneten Messdaten zu exportieren und in Programmen wie Excel weiterzuverarbeiten. Dadurch wird der ESP32 zu einem vielseitigen Werkzeug für den Unterricht, das nicht nur die Datenerfassung, sondern auch die Datenanalyse und -interpretation fördert.

6. Projekte

Im Folgenden werden exemplarisch zwei Projekte vorgestellt, die den Einsatz des ESP32 im MINT-Unterricht praxisnah veranschaulichen. Das erste Projekt konzentriert sich auf die vorgestellten Funktionen des Mikrocontrollers und hebt dessen zentrale Eigenschaften hervor. Das zweite Projekt demonstriert ergänzend die vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten des ESP32 und zeigt, wie dieser flexibel in unterschiedlichen Kontexten [8] eingesetzt werden kann.

6.1. Messung der Windgeschwindigkeit mit einem Anemometer und dem ESP32

Ziel dieses Projekts war es, die Windgeschwindigkeit [9] indirekt mithilfe des ESP32 zu bestimmen. Anstelle einer direkten Messung diente der interne Hall-Sensor des ESP32 als Schaltmechanismus, da dieser – wie im Kapitel 4 diskutiert – zuverlässig starke Magnetfelder detektiert. Für das Projekt kam ein selbst 3D-gedrucktes Anemometer (vgl. Abbildung 4) zum Einsatz. Der ausführliche physikalische und technische Hintergrund des Anemometers ist vor allem in Quelle [10] sowie ergänzend in den Quellen [11] und [12] beschrieben.



Abb.4: Zusammengesetztes Anemometer - 3D gedruckt. Eigene Darstellung.

An der rotierenden Dachkonstruktion dieses Anemometers war ein Neodym-Magnet befestigt (vgl. Abbildung 5).

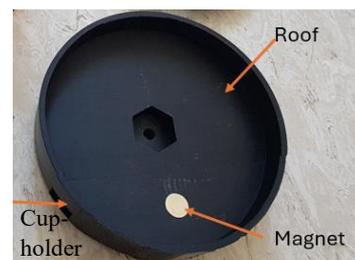


Abb. 5: Befestigter Neodym-Magnet im rotierenden Dach/Roof. Eigene Darstellung.

Bei jeder Umdrehung der Dachkonstruktion passierte der Magnet einen festgelegten Punkt, an dem der Hall-Sensor des ESP32 im kleinsten möglichen Abstand zu dem Magneten unter dem Dach positioniert war. Jedes Mal, wenn der Magnet diesen Punkt passierte, erfasste der Hall-Sensor das Magnetfeld und übermittelte ein Signal an den ESP32.

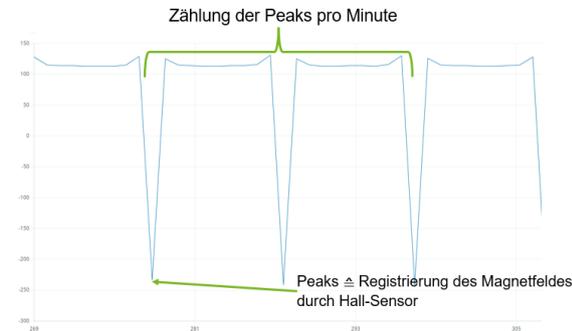


Abb. 6: Auswertung der ausgelesenen Daten durch den internen Hall-Sensor des ESP32. Eigene Darstellung.

Das Signal äußerte sich in einem negativen Peak wie in der Abbildung 6 zu sehen ist. Ein Peak repräsentiert eine Umdrehung der Dachkonstruktion bzw. des Anemometers und somit die Registrierung des Magnetfeldes ausgehend von Neodym-Magneten durch den internen Hall-Sensor des ESP32. Somit konnte der Microcontroller ESP32 die Umdrehungen des pro Minute erfassen. Die Auswertung und Zeitmessung erfolgten mithilfe eines selbst entwickelten Python-Skripts, das die eingehenden Signale analysierte.

Der Zusammenhang zwischen Windgeschwindigkeit und den registrierten Signalspitzen (Peaks) ist direkt: Je stärker der Wind, desto höher die Drehzahl des Anemometers und damit die Anzahl der erfassten Magnetfeldänderungen (Peaks) pro Minute.

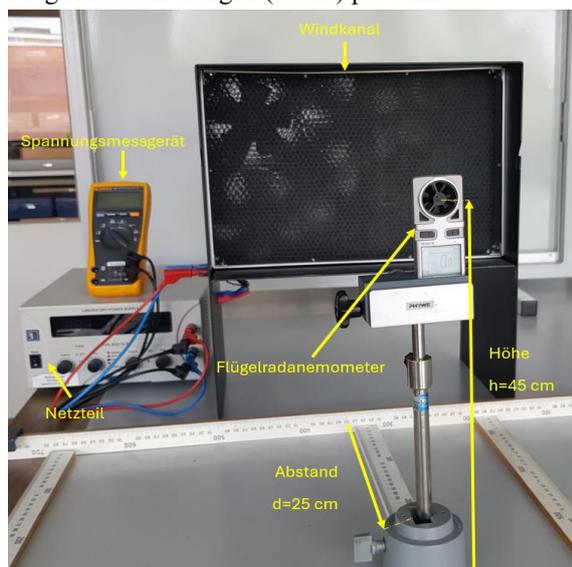


Abb. 7: Kalibrierungsprozess des Anemometers. Eigene Darstellung.

Zur Kalibrierung des selbstgebauten Anemometers wurde ein Windkanal verwendet [11], dessen Windgeschwindigkeit variiert werden konnte durch das

Einstellen verschiedener Spannungswerte am Netzteil. Zunächst wurde die vom Windkanal produzierte Windgeschwindigkeit mithilfe eines professionellen Flügelradanemometers (vgl. Abbildung 7) gemessen, um eine exakte Referenz zu erhalten.

Im nächsten Schritt wurde das selbstgebaute Anemometer vor Windkanal positioniert. Das experimentelle Setup ist identisch geblieben. Der ESP32 erfasste die Anzahl der Umdrehungen pro Minute (RPM) des Anemometers in Abhängigkeit von der eingestellten Spannung. Diese Daten ermöglichten eine Zuordnung der Windgeschwindigkeit zur gemessenen Drehzahl.

Auf Basis der erhobenen Messwerte wurde ein Kalibrierungsdiagramm (vgl. Abbildung 8) erstellt, das die Windgeschwindigkeit als Funktion der Drehzahl darstellt. Der resultierende Graph zeigt einen nahezu linearen Verlauf, was auf eine direkte Proportionalität zwischen Drehzahl und Windgeschwindigkeit hinweist [12]. Diese Kalibrierung ermöglichte es, aus der gemessenen Drehzahl des Anemometers präzise Rückschlüsse auf die tatsächliche Windgeschwindigkeit zu ziehen.

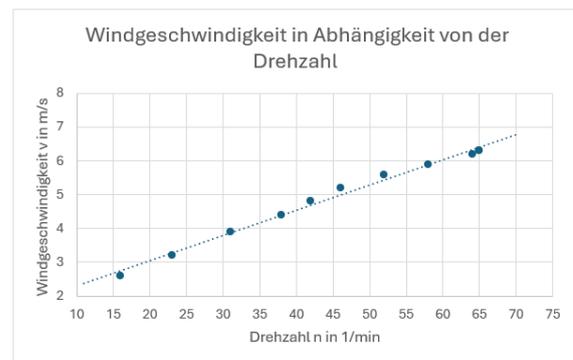


Abb. 8: Ergebnis der Kalibrierung des Anemometers und die damit indirekt Bestimmung der Windgeschwindigkeit mit dem Anemometer und ESP32. Eigene Darstellung.

6.2. Objekterkennung und -identifikation mit dem ESP32-CAM-Modul

Künstliche Intelligenz (KI) ist aus dem Alltag nicht mehr wegzudenken. Dieses Projekt zeigt, wie KI-basierte Bildverarbeitung auch auf kostengünstiger Hardware realisiert werden [13] kann und eröffnet spannende Möglichkeiten für den MINT-Unterricht.



Abb. 9: ESP-32-CAM-Modul. Eigene Darstellung.

In diesem Projekt wurde die Objekterkennung und –identifikation mithilfe des ESP32-CAM-Moduls (vgl. Abbildung 9), einem weiteren Mitglied der ESP32-Familie, realisiert.

Ziel des Projekts war es, einen Livestream über das Kameramodul des ESP32 bereitzustellen, der auf einem integrierten Webserver gehostet wird. Während des Livestreams erkennt das System Objekte in Echtzeit, indem es sie mit einer begrenzenden Box (Bounding Box) umrahmt und mit einer Klassifikation samt Erkennungswahrscheinlichkeit versieht [14] – wie in der Abbildung 10 am Beispiel eines Buches zu sehen ist.

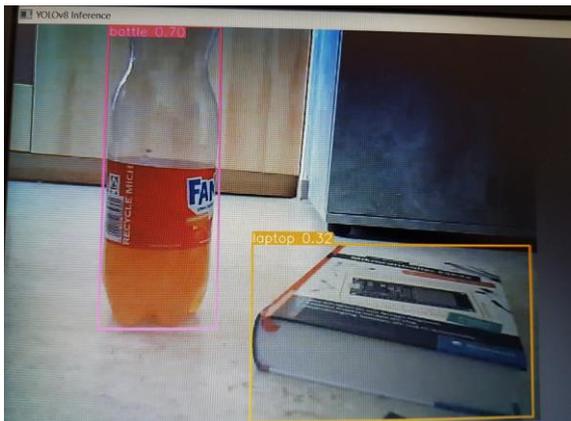


Abb. 10: Erkennung der Objekte durch Einrahmung und Benennung der eingerahmten Objekte, inklusive Wahrscheinlichkeitsanzeige für die Erkennungssicherheit. Eigene Darstellung.

Die Objekterkennung basiert auf YOLO (You Only Look Once), einem vortrainierten KI gestützten neuronalen Netzwerk, das für seine hohe Geschwindigkeit und Präzision bekannt ist.

7. Fazit: der ESP32 im MINT-Unterricht

Der ESP32 stellt ein wertvolles Werkzeug für einen kontextorientierten MINT-Unterricht dar und bietet einen klaren schulischen Mehrwert. Besonders hervorzuheben ist seine flexible Programmierung, die ihn im Vergleich zu anderen Mikrocontrollern auszeichnet. Während der interne Hall-Sensor lediglich qualitative Aussagen zulässt, ermöglicht die Bluetooth-Funktion den Einsatz mobiler Apps als Alternative zu traditionellen Computern. Zwei exemplarische Projekte veranschaulichen diese besonderen Eigenschaften des ESP32 und verdeutlichen sein Potenzial für den Einsatz im Unterricht.

8. Ausblick- Perspektiven des ESP32 im MINT-Unterricht und darüber hinaus

Der ESP32 eröffnet vielfältige Perspektiven – insbesondere durch seine Bluetooth-Funktion und die Anbindung an das Internet of Things (IoT). Anwendungen wie Smart-Home-Systeme oder automatisierte Bewässerungssysteme verdeutlichen das Potenzial des Mikrocontrollers für praxisorientierte Projekte. Darüber hinaus schafft der ESP32 neue Möglichkeiten für den Einsatz von Künstlicher Intelligenz, was

ihn nicht nur für den regulären Unterricht, sondern auch für Forschungs-AGs und Wettbewerbe wie "Jugend forscht" von Interesse macht.

Durch die Arbeit mit dem ESP32 erwerben Schüler und Schülerinnen wertvolle Zukunftskompetenzen in den Bereichen Programmierung, Sensorik, KI und Automatisierung und vertiefen gleichzeitig ihre naturwissenschaftliche Arbeitsweise.

9. Literatur

- [1] Läufer, T.; Oehler, D.-X. K.; Wetzel, S.; Ludwig, M.: Mikrocontrollerprojekte: Unterrichtsrelevante Beispiele aus dem Digitechnikum. In: MNU Journal/Verband zur Förderung des MINT-Unterrichts, Bd. 76 (2023), Nr. 2, S. 117–124
- [2] SINUS-Institut: Was motiviert zum MINT-Lernen? Bonn: Deutsche Telekom Stiftung, 2024
- [3] Espressif Systems: ESP32-WROOM-32 Datasheet. URL: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32_datasheet_en.pdf (Stand 05/2025)
- [4] Brandes, U.: Mikrocontroller ESP32 – Das umfassende Handbuch. 1. Aufl. Bonn: Rheinwerk, 2020
- [5] Bartmann, E.: Das ESP32-Praxisbuch: Programmieren mit der Arduino-IDE. 1. Aufl. München: Franzis, 2018
- [6] Schmidt, M.: Magnetfelder messen. In: Make Magazin, Bd. 14 (2019), S. 50–55.
- [7] Dorsel, D.: Sensordaten drahtlos zur Smartphone-App Phyphox übertragen und grafisch auswerten – ein einfaches Beispiel mit dem ESP32 und dem Ultraschallsensor HC-SR04. In: Schulpraxis. Januar 2023. URL: https://phyphox.org/p/mnu-arduino/mnu_journal_01_36-43.pdf (Stand 05/2025)
- [8] Parchmann, I.; Kuhn, J. (2018): Lernen im Kontext. In: Krüger, Dirk; Parchmann, Ilka; Schecker, Horst (Hrsg.): Theorien in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung. Berlin: Springer, S. 193–207
- [9] Kraus, H. (2004): Die Windgeschwindigkeit. In: Kraus, H. (Hrsg.): Die Atmosphäre der Erde. Springer, Berlin, Heidelberg, S. 33–44. URL: https://doi.org/10.1007/3-540-35017-9_6 (Stand 05/2025)
- [10] Emeis, S. (2022): Quellen für Winddaten. In: Windenergie Meteorologie. Springer Vieweg, Cham, S. 195–244. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-22446-1_7 (Stand 05/2025)
- [11] Deiss, O. (2001): Turbulenzeinflüsse bei der Messung der Windgeschwindigkeit. In: Fachhochschule Düsseldorf, Labor für Strömungsmaschinen, Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik

- [12] Manwell, J. F., McGowan, J. G., Rogers, A. L. (2009): Wind Energy Explained: Theory, Design and Application. 2. Aufl. New York: Wiley, S. 74–84
- [13] Mehendale, N.: Object Detection using ESP32 CAM. In: SSRN Electronic Journal. 2022. DOI: <https://doi.org/10.2139/ssrn.4152378>
- [14] C, P.; L, V.; K, P.; S, P.; Rahiman, S.: Enhanced IoT Devices with Intelligent System for Object Detection. In: 2023 9th International Conference On Smart Structures And Systems, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1109/icsss58085.2023.10407058>

Einstellung von Lernenden zum Einsatz von (interaktiven) Experimentiervideos

Mathias Ziegler*, Lisa Stinken-Rösner*

*Universität Bielefeld, Physik und ihre Didaktik, Universitätsstraße 25, 33615 Bielefeld
mziegler@physik.uni-bielefeld.de

Kurzfassung

Eigenständiges Experimentieren stellt ein zentrales Element des Physikunterrichts dar. Nicht immer können jedoch Schüler*innenexperimente durchgeführt werden. (Interaktive) Experimentiervideos bieten hier eine digitale Alternative, da sie unabhängig von Rahmenbedingungen wie vorhandenem Material oder möglichen Gefahrenquellen genutzt werden und an die Lerngruppe angepasst werden können. Ihre erfolgreiche Implementation in den Physikunterricht hängt unter anderem von der Einstellung der Lehrkräfte ab, die grundsätzlich positiv erscheint. Ergänzend wurden in der hier vorgestellten Studie die Einstellungen der Schüler*innen gegenüber dem Medium Experimentiervideo erhoben, da bekannt ist, dass positive Einstellungen gegenüber Lehr-Lernmedien sich förderlich auf das Engagement und Fachinteresse der Schüler*innen im Fach auswirken.

Die Ergebnisse zeigen eine überwiegend positive Einstellung zur Arbeit mit (interaktiven) Experimentiervideos, wobei Schüler*innen unterschiedliche, zum Teil gegensätzliche, Sichtweisen – insbesondere im Vergleich zum Realexperiment – auf das Medium haben.

1. Ausgangslage

Digitale Medien spielen im schulischen Alltag eine bedeutende Rolle. Die International Computer and Information Literacy Study (ICILS) 2023 gibt an, dass 70 % der Lehrkräfte zumindest einmal am Tag digitale Medien einsetzen (Eickelmann et al., 2024). Vergleicht man die vorliegenden Zahlen mit denen früherer Studien aus den Jahren 2018 (23,2 %) und 2013 (9,1 %), so lässt sich eine deutliche Zunahme der Nutzung digitaler Medien feststellen. Diese Zahlen sind jedoch irreführend, da etablierte Medien, wie Textverarbeitungs- oder Präsentationsprogramme häufiger verwendet werden als innovative und/oder fachspezifische Medien (Eickelmann et al., 2024).

Dabei sind es gerade diese Typen von Medien, die ein hohes Potential haben, aktuelle fachdidaktische Probleme zu lösen. Sie eröffnen eine neue Perspektive auf die Gestaltung der Lernprozesse von Schüler*innen und bieten neue Möglichkeiten für das Experimentieren im Physikunterricht.

2. Problemstellung

Das Experiment stellt eine zentrale Methode der Erkenntnisgewinnung im Physikunterricht dar (Tesch & Duit, 2004). Sie lassen sich vorrangig in Demonstrationsexperimente und Schüler*innenexperimente, je nach durchführender Person(en), unterscheiden. Der Aufgabenbereich der Schüler*innen verlagert sich vom Beobachten beim Demonstrationsexperiment zur aktiven Versuchsdurchführung beim Schüler*innenexperiment (Girwidz, 2020). Schüler*innenexperimente setzen voraus, dass die erforderlichen Versuchsmaterialien in ausreichendem Umfang verfügbar sind und dass die sicherheitstechnischen Vorgaben eingehalten werden können. Dies ist

insbesondere bei Experimenten mit potenziell gefährlichen Materialien (Hochspannungsnetzgerät, radioaktive Stoffe, ...) von großer Wichtigkeit. In der schulischen Praxis stellen diese Bedingungen allerdings oft zugleich auch einschränkende Faktoren dar, weil dadurch zahlreiche Experimente, die aus didaktischer Sicht grundsätzlich sinnvoll für eine eigenständige Durchführung durch Schüler*innen wären, nicht umsetzbar sind und daher häufig als Alternative von den Lehrkräften als Demonstrationsexperiment vorgeführt werden.

Ein Ansatz diese Problematik zu adressieren, stellen Experimentiervideos dar.

3. Experimentiervideos

Unter Experimentiervideos versteht man Lernmedien, die das Experimentieren als Methode der Erkenntnisgewinnung mit dem digitalen Werkzeug der Videographie verbinden (Stinken-Rösner & Meier, 2023; siehe Beispiel in Abbildung 1).

Experimentiervideos weisen eine lineare Videostruktur auf. Das heißt, sie zeigen den experimentellen Ablauf in einer zuvor festgelegten Abfolge von Handlungsschritten. Die Schüler*innen stellen beim Betrachten des Videos Beobachtungen an und nehmen ggf. Messwerte auf. Die Versuchsauswertung findet im Anschluss losgelöst vom Video statt, indem beispielsweise Messwerte ausgewertet und interpretiert werden oder das Versuchsergebnis qualitativ diskutiert wird.



Abb.1: Experimentiervideo zum Versuch „Kugel im E-Feld des Plattenkondensators“. Dieser Versuch wird mit Hochspannung durchgeführt, so dass er als Schüler*innen-experiment ungeeignet ist (eigene Darstellung).

Beim Einsatz von Experimentiervideos besteht, genauso wie bei der Durchführung eines Demonstrationsexperimentes die Gefahr, dass die Schüler*innen lediglich „passive“ Zuschauer*innen sind (ICAP-Modell; Chi & Wylie, 2014). Um eine höhere kognitive Aktivierung zu erzielen, können jedoch zusätzliche Interaktionsmöglichkeiten in den Videos integriert werden.

3.1. Interaktive Experimentiervideos

Interaktive Experimentiervideos unterscheiden sich von Experimentiervideos dadurch, dass die Schüler*innen nicht in der Beobachtenden-Rolle verbleiben, sondern sie aktiv mit dem Medium in Interaktion treten können. Dadurch entwickeln sie ein tieferes Verständnis der physikalischen Fachinhalte (Meier et al., 2022b). Die Umsetzung erfolgt, indem interaktive sowie multimediale H5P-Elemente in die Experimentiervideos eingebettet werden (vgl. Abbildung 2). Dabei handelt es sich um verschiedene Aufgabentypen (z.B. Multiple-Choice, Single-Choice, Lückentext, ...), die von den Schüler*innen aufgerufen und bearbeitet werden können (Glatz & Erb, 2004). Viele der Elemente beinhalten eine Feedbackfunktion, durch die die Schüler*innen unmittelbar eine Rückmeldung zu ihren Antworten erhalten und mögliche Fehler erkannt sowie korrekte Antworten angezeigt werden.

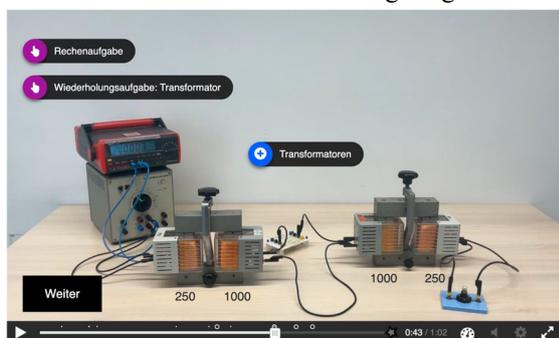


Abb.2: Interaktives Experimentiervideo zum Freileitungsversuch. Es wurden z.B. Multiple-Choice-Aufgaben (in violett) sowie Textfelder (in schwarzer Schrift) eingefügt (eigene Darstellung).

3.2. Hypervideos

Unter Hypervideos versteht man interaktive Experimentiervideos, die eine nicht-lineare Videostruktur aufweisen (Ziegler & Stinken-Rösner, 2024). Dies ermöglicht den Schüler*innen, Einfluss auf den Verlauf des Videos zu nehmen, indem sie beispielsweise Variablen variieren können. Für eine sinnvolle didaktische Umsetzung muss der zugrundeliegende Versuch so gestaltet sein, dass sich Änderungen einzelner Parameter direkt auf das Versuchsergebnis auswirken.

Zur Entwicklung eines Hypervideos wird das zugrundeliegende Experimentiervideo entsprechend der Variationsmöglichkeiten in einzelne Videofragmente zerteilt. Diese Fragmente werden mit Hilfe von Verzweigungsfragen miteinander verknüpft. Zu jeder Verzweigungsfrage werden verschiedene Antwortalternativen formuliert, die den unterschiedlichen Ausprägungen der Versuchsparameter entsprechen. Im Video wird die Verzweigungsfrage dann zusammen mit den Antwortalternativen angezeigt. Durch das Auswählen einer Antwortalternative gelangen die Schüler*innen zum entsprechenden Videofragment.

Hypervideos ermöglichen es Schüler*innen, eigenständige Entscheidungen im Experimentierprozess zu treffen und damit den Einfluss einzelner Variablen auf das Versuchsergebnis zu untersuchen.

4. Implementation in den Unterricht

Empirische Studien, die die Implementation von Experimentiervideos im Physikunterricht sowie deren Effekte, z. B. Einstellung gegenüber dem Medium oder Motivation und Lernwirksamkeit, in den Blick nehmen, liegen bisher nur in begrenzter Anzahl vor.

Eine Fragebogenstudie im Rahmen des VidEX-Projekts (Meier et al., 2022a) kam zu dem Schluss, dass die teilnehmenden Lehrkräfte (interaktiven) Experimentiervideos überwiegend positiv gegenüberstehen. Gleichzeitig wurde jedoch deutlich, dass eine Gruppe von Skeptiker*innen der Meinung ist, dass reales Experimentieren wichtiger sei. Sie befürchten, real durchgeführte Experimente könnten durch den Einsatz von Experimentiervideos aus dem Physikunterricht verdrängt werden (Meier et al., 2022a). Diese Skepsis lässt sich darauf zurückführen, dass einige Lehrkräfte die (interaktiven) Experimentiervideos nicht als Ergänzung zum Realexperiment sehen, sondern als Ersatzmedium ohne funktionalen Mehrwert für den Experimentierprozess (vgl. SAMR-Modell nach Puentedura, 2006).

Studien zur Wirkung von Experimentiervideos auf Schüler*innenebene liegen bisher kaum vor. Ein Grund dafür stellt die relative Neuheit des Mediums dar. Entsprechend sind auch die Einstellungen von Schüler*innen im Umgang mit Experimentiervideos, auch z.B. im Vergleich zum Realexperiment oder interaktiven Simulationen, bislang unerforscht. Dabei gelten positive Einstellungen gegenüber den im Unterricht genutzten Lehr-Lernmedien und Sozialformen weithin als Prädiktor für das Interesse am Fach

(Trumper, 2006). Durch die gezielte Wahl von Medien, denen die Schüler*innen positiv gegenüberstehen, kann somit potenziell das Engagement und die Motivation im Physikunterricht gefördert werden.

5. Forschungsfrage

Ausgehend von den Ausführungen zur Implementation (interaktiver) Experimentiervideos in den Physikunterricht ergibt sich die folgende Forschungsfrage:

Welche Einstellungen haben die Schüler*innen nach einer erstmaligen Nutzung von (interaktiven) Experimentiervideos?

6. Setting

Die Erhebung fand zwischen Juni 2024 und März 2025 im Schüler*innenlabor teutolab-physik der Universität Bielefeld statt. Alle Erprobungen weisen eine Dauer von circa 3 Stunden auf.

Die Schüler*innen haben, je nach Altersstufe und Zeitpunkt im Schuljahr, mit jeweils vier (interaktiven) Experimentiervideos bzw. Hypervideos aus den Themenbereichen Geschwindigkeit, Beschleunigung und Kräfte (Klasse 9), Kräfte und einfache Maschinen (Klasse 9) bzw. E- und B-Felder (Q1) gearbeitet. Jede Gruppe erhält Arbeitsmaterial, bestehend aus einem Tablet mit Experimentiervideos sowie begleitenden Arbeitsblättern. Die Arbeitsblätter umfassen fachliche Erläuterungen zu den jeweiligen Experimenten, eine Beschreibung der Versuchsdurchführung und Aufgaben zur Versuchsauswertung. Die Schüler*innen arbeiten in 2er bzw. 3er Gruppen.

Bei der Entwicklung der Materialien wurde darauf geachtet, möglichst verschiedene Einsatzszenarien von Experimentiervideos (für eine Übersicht siehe Stinken-Rösner & Meier, 2023) im Schüler*innenlabor zu verwenden. Des Weiteren wurde auf ein unterrichtsähnliches Setting geachtet, damit ähnliche Bedingungen wie im schulischen Alltag vorliegen und die erwarteten Ergebnisse übertragbar auf die Schulpraxis sind. Dafür erfolgte von einer fiktiven Lehrkraft zu jedem Experimentiervideo zunächst eine Hinführung im Plenum. Anschließend wurde erklärt, mit welchem Ziel die Arbeit mit dem Experimentiervideo verbunden ist und notwendige Vorkenntnisse aktiviert. Nach der Erarbeitung mit dem Experimentiervideo wurden die Ergebnisse im Plenum gesichert.

7. Forschungsmethodik

Die Datenerhebung erfolgt im Mixed-Methods-Ansatz. Die Einstellung der Schüler*innen zum Umgang mit (interaktiven) Experimentiervideos wird nach dem Besuch des Schüler*innenlabors quantitativ mithilfe eines standardisierten Fragebogens erfasst (adaptiert nach Stinken-Rösner & Laumann; 2024). Dieser umfasst je fünf Items zur affektiven, verhaltensbezogenen und kognitiven Einstellung (abc-model of attitudes; Breckler, 1984) gegenüber (interaktiven) Experimentiervideos. Die Bewertung erfolgt auf einer fünfstufigen Likert-Skala (0 – trifft gar nicht zu,

4 – trifft völlig zu). Ergänzend dazu erfolgt eine qualitative Erhebung zu den wahrgenommenen Vor- und Nachteilen von (interaktiven) Experimentiervideos. Hierzu geben die Schüler*innen schriftliches Feedback in einer vorstrukturierten Tabelle. Während der Fragebogen von jedem*r Schüler*in individuell ausgefüllt wird, werden die Tabellen in Gruppen erstellt, wodurch sich die Fallzahlen unterscheiden und keine direkten Rückschlüsse von den qualitativen auf die quantitativen Daten erfolgen können.

8. Stichprobe

Die Stichprobe umfasst 127 Schüler*innen aus sechs Klassen von Schulen des Landes Nordrhein-Westfalen. Alle Schüler*innen haben freiwillig, ggf. mit Erlaubnis der Erziehungsberechtigten, und anonym an der Befragung teilgenommen.

Von den Schüler*innen sind 75 weiblich und 49 männlich (w: 59 %, m: 39 %, Rest: keine Angabe). Im Mittel sind sie 15,05 Jahre alt (SD = 1,24). Die Abbildung 3 zeigt die Altersstruktur der Schüler*innen im Detail.

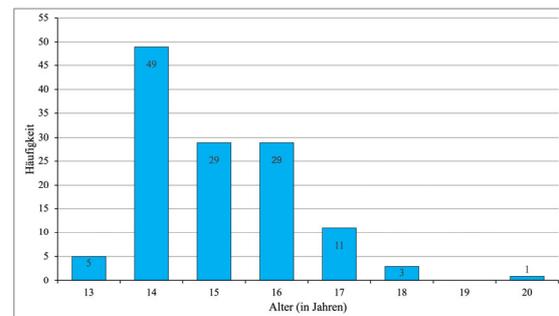


Abb.3: Altersstruktur der Teilnehmer*innen (eigene Darstellung).

Die Schüler*innen gehören unterschiedlichen Jahrgangsstufen an. Zwölf von ihnen sind in der achten Jahrgangsstufe, 65 in der neunten Jahrgangsstufe, 30 in der zehnten Jahrgangsstufe und 20 in der elften Jahrgangsstufe.

Darüber hinaus besuchen die meisten Teilnehmer*innen ein Gymnasium oder eine Realschule (vgl. Abbildung 4).

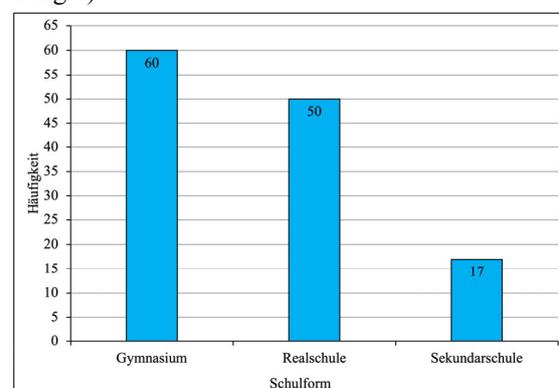


Abb.4: Säulendiagramm zur Schulform der teilnehmenden Schüler*innen (eigene Darstellung).

9. Ergebnisse – Einstellung der Schüler*innen gegenüber Experimentiervideos

In der folgenden Ergebnisdarstellung wird zunächst der Mittelwert der Einstellung zum Umgang mit (interaktiven) Experimentiervideos für alle teilnehmenden Schüler*innen präsentiert. Anschließend erfolgt eine differenzierte Betrachtung nach Geschlecht, Alter und Schulform.

9.1. Allgemein

Der Skalenmittelwert der Einstellung zum Umgang mit (interaktiven) Experimentiervideos für alle teilnehmenden Schüler*innen beträgt 2,6 (SD = 0,9). Nach Betrachtung der Mittelwerte der einzelnen Dimensionen lässt sich sagen, dass die affektive Dimension mit 2,8 (SD = 0,9) den höchsten Wert aufweist. Der Mittelwert für die kognitive Dimension beträgt 2,7 (SD = 0,9) und für verhaltensbezogene Dimension 2,5 (SD = 1,0). In Abbildung 5 werden die Daten durch Boxplots veranschaulicht. Auffällig ist vor allem die große Streuung der Daten, die nahezu die gesamte Skala umfasst.

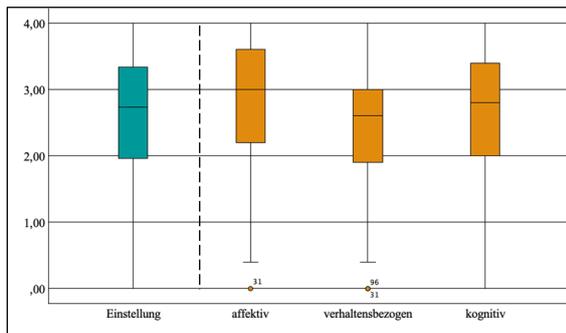


Abb.5: Boxplots zur Einstellung der teilnehmenden Schüler*innen zum Umgang mit Experimentiervideos insgesamt (türkis) und differenziert nach den Dimensionen (orange) (eigene Darstellung).

9.2. Geschlecht

Eine Differenzierung nach dem Geschlecht der teilnehmenden Schüler*innen zeigt, dass Schülerinnen eine positivere Einstellung zum Umgang mit (interaktiven) Experimentiervideos haben als Schüler

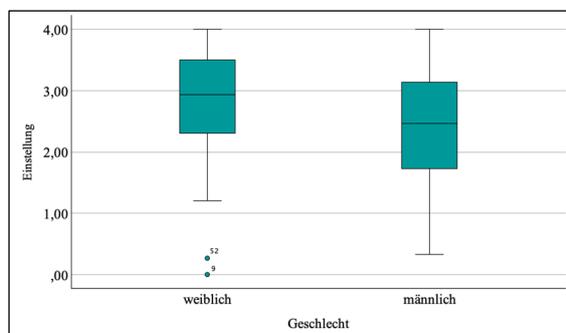


Abb.6: Boxplot zur Einstellung der Schüler*innen zum Umgang mit (interaktiven) Experimentiervideos differenziert nach dem Geschlecht (eigene Darstellung).

($MW_W = 2,8$; $SD_W = 0,9$; $MW_M = 2,4$; $SD_M = 0,9$; vgl. Abbildung 6).

Shapiro-Wilk-Tests sowie eine zusätzliche grafische Überprüfung des Q-Q-Plots für die Gruppe der Schülerinnen (vgl. Abbildung 7) weisen darauf hin, dass beide Stichproben als normalverteilt angenommen werden können.

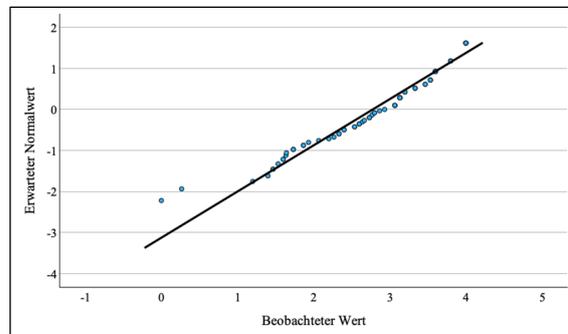


Abb.7: Q-Q-Plot für die Daten der Schülerinnengruppe (eigene Darstellung).

Der abschließende t-Test für unabhängige Stichproben zeigt einen statistisch signifikanten Unterschied zwischen den Schülerinnen und Schülern in der Einstellung zum Umgang mit (interaktiven) Experimentiervideos, $t(119) = 2,153$, $p = .033$. Die Effektstärke (Cohen's d) beträgt .403, was auf einen kleinen Effekt hindeutet.

9.3. Alter

Abbildung 8 zeigt in Form eines Boxplots die Einstellung der Schüler*innen zum Umgang mit Experimentiervideos differenziert nach dem Alter. Dabei wurden die Schüler*innen im Alter von 17 bis 20 Jahren aufgrund der geringen Gruppengrößen zusammengefasst.

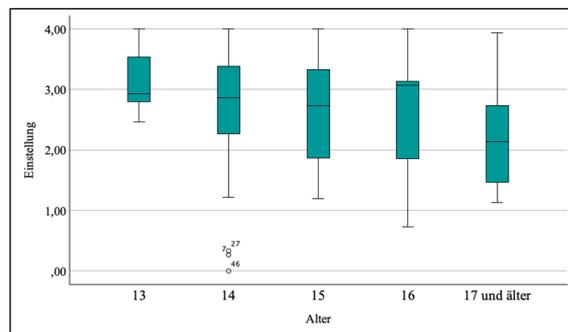


Abb.8: Boxplot der Einstellung der Schüler*innen differenziert nach dem Alter (eigene Darstellung).

Es sind kaum Unterschiede zwischen den Altersstufen 14 bis 16 zu erkennen. Über alle Altersstufen hinweg ergibt sich eine leicht abfallende Tendenz, was sich am stärksten für die Gruppe der siebzehnjährigen und älteren Schüler*innen zeigt. Die Mittelwerte bestätigen diesen Befund (vgl. Tabelle 1).

Tab.1: Aufstellung der Mittelwerte für die einzelnen Altersstufen der Schüler*innen.

Alter in Jahren	Mittelwerte der Einstellung
13	3,1 (SD = 0,6)
14	2,7 (SD = 0,9)
15	2,7 (SD = 0,9)
16	2,7 (SD = 0,9)
17 und älter	2,0 (SD = 0,8)

Aufgrund der geringen Stichprobengrößen für die Altersstufe 13 bzw. der siebzehnjährigen und älteren Schüler*innen (5 bzw. 15 Schüler*innen) wird auf eine Berechnung statistisch signifikanter Unterschiede verzichtet.

9.4. Schulform

Bei Betrachtung der Werte für die Einstellung für die einzelnen Schulformen ergeben sich ebenfalls kaum Unterschiede. Der Mittelwert für die Schüler*innen, die ein Gymnasium besuchen liegt bei 2,6 (SD = 0,9) bei den Realschüler*innen bei 2,8 (SD = 0,7). Der Wert für die Sekundarschüler*innen ist geringfügig niedriger und beträgt 2,3 (SD = 1,1).

Auf eine Berechnung statistisch signifikanter Unterschiede wird aufgrund der geringen Gruppengröße der Sekundarschüler*innen verzichtet.

10. Ergebnisse – Vor- und Nachteile aus Sicht der Schüler*innen

Im Folgenden werden exemplarische Ergebnisse aus den Rückmeldungen der Schüler*innen zu den Vor- und Nachteilen zum Umgang mit Experimentiervideos präsentiert, die im Rahmen der qualitativen Erhebung erfasst wurden. Dabei werden nur diejenigen Aspekte genannt, die am häufigsten von den Schüler*innen notiert wurden. Beispielsweise geben die Schüler*innen folgende Aspekte an:

Tab.2: Gegenüberstellung genannter Vorteile (grün) und Nachteile (orange) zu affektiven Merkmalen, Merkmalen der Experimentierkompetenz und Merkmalen individuellen Lernens.

Affektive Merkmale	
- macht Spaß - man ist motivierter - Abwechslung	- macht keinen Spaß - Ablenkung durch digitale Medien
Experimentierkompetenz	
- Veranschaulichung des Versuchsablaufs	- begrenzte Möglichkeiten bei dem Experimentieren - Beobachtung aus fester Perspektive - keine Auseinandersetzung mit dem Versuchsaufbau im Realen

Individuelles Lernen	
- Experimentiervideos lassen sich beliebig oft anschauen - Experimentiervideos lassen sich pausieren und zurückspulen - man lernt im eigenen Tempo	- keine individuellen Fragen zum Video - keine eigenen Erfahrungen

11. Diskussion der Ergebnisse

Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Einstellung der Schüler*innen nach der erstmaligen Nutzung von (interaktiven) Experimentiervideos grundsätzlich positiv gegenüber dem Medium ist.

Betrachtet man die Werte der einzelnen Dimensionen der Einstellung, so lässt sich konstatieren, dass Experimentiervideos im Mittel vor allem die affektive Dimension adressieren. Sie sprechen also die Emotionen der Schüler*innen an, was vereinzelt durch Rückmeldungen von Schüler*innen bestätigt wurde. Diese geben an, dass das digitale Experimentieren mit Experimentiervideos Spaß mache, motivierend wirke und Abwechslung in den Physikunterricht bringe. Diese Tendenzen sprechen für eine positive Sichtweise auf das Medium (interaktives) Experimentiervideo.

Außerdem scheinen Experimentiervideos vor allem die Schülerinnen anzusprechen. Es konnte ein signifikanter Unterschied zwischen den Schülerinnen und den Schülern nachgewiesen werden, wobei keine Gründe für diesen Zusammenhang gezielt erhoben wurden. Es kann jedoch vermutet werden, dass Experimentiervideos das Potential haben, bestehende Barrieren im Umgang mit Realexperimenten abzubauen. Mögliche Berührungspunkte mit unbekanntem Gerätschaften oder die Sorge, Materialien kaputt zu machen, fallen im digitalen Setting nicht so stark ins Gewicht. Demnach ermöglichen Experimentiervideos ein Experimentieren, ohne dass die technische Komponente des Versuchs zum Tragen kommt. Der Effekt ist als klein bis mittel einzustufen, weist aber auf einen moderaten Unterschied zwischen den Gruppen hin.

Zwischen den verschiedenen Altersstufen der Schüler*innen zeigten sich bei fast allen Stufen nur geringfügige Unterschiede in der Einstellung gegenüber der Nutzung von (interaktiven) Experimentiervideos. Interessant ist jedoch, dass vor allem die Schüler*innen im Alter von 17 Jahren und älter tendenziell geringere Werte der Einstellung angegeben haben. Dies kann teilweise durch ihren schulischen Hintergrund erklärt werden. Laut Aussage der Lehrkraft haben sie bereits viele Erfahrungen mit dem Experimentieren im Fachunterricht sammeln können, da ihre Schule sehr gut ausgestattet sei. Daher könnten die Schüler*innen Experimentiervideos als Einschränkung ihres gewohnten Unterrichtsablaufs wahrgenommen haben.

Deswegen wurde der Einsatz von Experimentiervideos zwar als motivierendes Tool mit Spaßfaktor empfunden, aber zugleich auch Realerfahrungen einen höheren Stellenwert zugeordnet. Die Rückmeldungen der Schüler*innen zur Experimentierkompetenz bestätigen diese Sichtweise (vgl. Tabelle 2).

Obwohl die Einstellung der Schüler*innen im Mittel grundsätzlich positiv ist, ist die Sichtweise auf das Medium ambivalent. Die Schüler*innen geben zwar hohe Werte für die Einstellung an, jedoch zeigen die Boxplots durchgängig eine große Streuung in den Daten. Dies zeigt, dass die Schüler*innen Experimentiervideos nicht einheitlich positiv bewerten. Tabelle 2 zeigt unterschiedliche, zum Teil gegensätzliche Sichtweisen auf das Medium (interaktives) Experimentiervideo. Während einige Schüler*innen Spaß im Umgang mit Experimentiervideos erleben und finden, dass sie motivierend wirken, sind andere Schüler*innen der Meinung, sie machen (im Vergleich zum Realexperiment) keinen Spaß und dass digitale Medien generell eine Ablenkung darstellen. Während zum einen angegeben wird, dass Experimentiervideos den Versuchsablauf veranschaulichen, wird von anderen Schüler*innen kritisch angemerkt, dass Experimentiervideos das Experimentieren durch eine feste Beobachtungsperspektive und begrenzten Experimentiermöglichkeiten einschränken. Außerdem wird hervorgehoben, dass Experimentiervideos das individuelle Lernen fördern, indem man sie pausieren, zurückspulen und beliebig oft wiederholen kann. Es wird aber gleichzeitig entgegnet, dass man keine individuellen Fragen an das Video stellen könne.

12. Limitationen

Eine wesentliche Einschränkung der vorliegenden Studie ergibt sich aus der geringen Stichprobengröße. Dies ist insbesondere im Hinblick auf die Bildung der Gruppen hinsichtlich des Alters und der Schulform problematisch. Aufgrund der geringen Anzahl an Schüler*innen in einzelnen Teilgruppen war eine Überprüfung der Ergebnisse auf Signifikanz nicht immer möglich, was die Generalisierbarkeit der Ergebnisse einschränkt.

Darüber hinaus ist ein kritisches Hinterfragen hinsichtlich der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf den schulischen Kontext erforderlich. Bei der Konzeption der Erprobung wurde auf die Gestaltung eines unterrichtsähnlichen Settings geachtet. Das Setting wich in einigen Aspekten von dem des regulären Unterrichts ab. Die Schüler*innen sahen sich mit einer ihnen nicht vertrauten Umgebung und einer fremden Lehrkraft konfrontiert, was die Resultate der Untersuchung potenziell beeinflussen kann.

13. Zusammenfassung

Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchungen legen nahe, dass die Nutzung von Experimentiervideos von Schüler*innen grundsätzlich positiv bewertet wird, wobei sich jedoch deutliche individuelle Unterschiede in der Einstellung erkennen lassen.

Insbesondere konnte nachgewiesen werden, dass Schülerinnen sich aufgeschlossener gegenüber dem Einsatz von Experimentiervideos zeigen. Mögliche Gründe für diesen Sachverhalt können nur vermutet werden und sollten durch weitere Studien erforscht werden. Zudem wurde deutlich, dass jüngere Schüler*innen positiver gegenüber dem Einsatz von Experimentiervideos eingestellt sind als ältere Schüler*innen.

(Interaktive) Experimentiervideos haben, didaktisch sinnvoll eingesetzt, ein großes Potenzial für den Physikunterricht. Die hier vorliegende Studie sowie erste Erhebungen zur Akzeptanz von Lehrkräften gegenüber diesem Medium bestärken die theoretisch angenommenen positiven Wirkungen auf das Lehren und Lernen von Physik. Für weitere Erkenntnisse zur Wirkung in der Unterrichtspraxis gilt es, eine verstärkte Implementation von Experimentiervideos in den Physikunterricht aktiv voranzutreiben.

14. Literatur

- Breckler, S.J. (1984). Empirical Validation of Affect, Behaviour and Cognition as Distinct Components of Attitude. *Journal of Personality and Social Psychology*, 47(6), 1191–1205.
- Ajzen, I. (1991). The theory of planned behaviour. *Organizational Behaviour and Human Decision Processes*, 50(2), 179–211.
- Breckler, S.J. (1984). Empirical Validation of Affect, Behaviour and Cognition as Distinct Components of Attitude. *Journal of Personality and Social Psychology*, 47(6), 1191–1205.
- Chi, M. T. H. & Wylie, R. (2014). The ICAP framework: Linking cognitive engagement to active learning outcomes. *Educational Psychologist*, 49(4), 219–243.
- Eickelmann, B., Fröhlich, N., Bos, W., Gerick, J., Goldhammer, F., Schaumburg, H., Schwippert, K., Senkbeil, M., & Vahrenhold, J. (Hrsg.) (2024). *ICILS 2023 #Deutschland. Computer- und informationsbezogene Kompetenzen und Kompetenzen im Bereich Computational Thinking von Schüler*innen im internationalen Vergleich*. Waxmann.
- Girwidz, R. (2020). Experimente im Physikunterricht. In E. Kircher, R. Girwidz & H. Fischer (Hrsg.), *Physikdidaktik. Grundlagen* (S. 263–291). Springer Spektrum.
- Glatz, L. C. & Erb, R. (2024). Experimente als interaktive Videos – Die Einführung des Teilchenmodells interaktiv gestalten. *NiU – Physik*, 203, 18–22.
- Meier, M., Kastaun, M. & Stinken-Rösner, L. (2022a). Experimentiervideos im naturwissenschaftlichen Unterricht – Lehren und Lernen mit und durch VidEX. In E. M. Watts & C. Hoffmann (Hrsg.), *Digitale NAWigation von Inklusion. Digitale Werkzeuge für einen inklusiven Naturwissenschaftsunterricht* (S. 51–65). Springer VS.

- Meier, M., Stinken-Rösner, L. & Zeller, D. (2022b). Interaktive Videoformate für den naturwissenschaftlichen Unterricht. Vom Rezipieren zum Interagieren. *Unterricht Biologie*, 475, 44–47.
- Puentedura, R. (2006). Transformation, Technology, and Education [Blog post]. <http://hippasus.com/resources/tte/>
- Stinken-Rösner, L. & Meier, M. (2023). Experimentiervideos – Mehr als ein Ersatz für Realexperimente. *Plus Lucis*, 3, 17–21.
- Stinken-Rösner, L. & Laumann, D. (2023). Messung der Einstellungen von Lernenden zu Experimenten im Unterricht. In H. Van Vorst (Hrsg.), *Frühe naturwissenschaftliche Bildung. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik. Jahrestagung in Hamburg 2023* (S. 550–553).
- Tesch, M. & Duit, R. (2004). Experimentieren im Physikunterricht – Ergebnisse einer Videostudie. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 10, 51–69.
- Trumper, R. (2006). Factors Affecting Junior High School Students' Interest in Physics. *Journal of Science Education and Technology*, 15(1), 47–58.
- Ziegler, M. & Stinken-Rösner, L. (2024). Mit Hypervideos digital experimentieren. *NiU – Physik*, 203, 24–27.
- Ziegler, M. & Stinken-Rösner, L. (2024). Lernen mit (interaktiven) Experimentiervideos. Schülerlabore als Orte der Lehrkräftefortbildungen (LFB). *PhyDid B – Didaktik der Physik – Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung 2024*.

Danksagung

Wir bedanken uns herzlich bei allen Lehrkräften und ihren Lerngruppen, die an der Erprobung der (interaktiven) Experimentiervideos teilgenommen haben.

PUMA : Optiklabor in der Praxis – erste Erfahrungen mit der interaktiven WebAR-Simulation

Stefan Kraus, Thomas Trefzger

Lehrstuhl für Physik & ihre Didaktik, Universität Würzburg
stefan.kraus@physik.uni-wuerzburg.de

Kurzfassung

Das PUMA (Physikunterricht mit Augmentierung) Optiklabor stellt eine webbasierte Augmented Reality Umgebung zur Verfügung, die Schülerinnen und Schülern neue Experimentiermöglichkeiten jenseits von Realexperiment und Bildschirmsimulation schafft. Als digitales Schülerexperimentierset verwenden die Jugendlichen auf dem Tisch verteilte Papiermarker. Der Blick „durch“ Smartphone oder Tablet-PC ergänzt Geräte wie Laser, Kerzen, Schirme usw., die für den Anfangsunterricht der Optik benötigt werden. Mit diesen Gegenständen kann im dreidimensionalen Raum frei experimentiert werden. Dank des browserbasierten Ansatzes entfällt die Notwendigkeit einer Installation, was einen flexiblen Einsatz ermöglicht.

Im Schuljahr 2024/25 wird die WebApp in der Sekundarstufe I bayerischer Realschulen und Gymnasien erprobt. Begleitend füllen die Schülerinnen und Schüler Fragebögen zu technischen und affektiven Aspekten, wie auch Fachwissen aus. Trotz noch laufender Studie bieten sich bereits vielfältige Einblicke in die erhobenen Daten.

1. Motivation

In den letzten Jahren hielten verstärkt sogenannte „Schülerübungskästen“ Einzug in die Physiksammlungen. Diese ermöglichen den Schülerinnen und Schülern, vielerlei Versuche selbst durchzuführen. So sehr diese Entwicklung zu begrüßen ist, scheitert es in der Praxis aber häufig am Budget des Sachaufwandsträgers, das Equipment umfassend und in großer Stückzahl zur Verfügung zu stellen. Zudem erfordert der Einsatz der Schülerexperimente stets einen gewissen zeitlichen Aufwand, der nicht immer mit dem eng getakteten Lehrplan vereinbar ist. Darüber hinaus stehen die Materialien in der Regel nur innerhalb des Unterrichts zur Verfügung, so dass die Lernenden bei der Vor- und Nachbereitung keinen Zugriff darauf haben. Alternativ stehen zu vielen Experimenten Bildschirmsimulationen bereit, wie z. B. die HTML-Simulationen von PHET. [1] Dabei muss allerdings sehr darauf geachtet werden, die zweidimensionalen, abstrakt gehaltenen Inhalte mit der Realität zu verknüpfen. [2]

2. Konzept

Die hier vorgestellte Applikation versucht eine weitere Art der Bildschirmsimulation bereit zu stellen, welche näher am echten Experiment sein soll, ohne dessen Nachteile aufzuweisen. Ziel dabei soll keinesfalls sein, das echte Experiment zu ersetzen. Es geht darum, neue Gelegenheiten des Experimentierens zu erschließen.

Kernidee ist das Schaffen haptischer Erfahrung trotz der Durchführung eines rein digitalen Experiments. Hierbei soll keine größere Einarbeitung notwendig sein, die mit der Bedienung einer Software und ihrer Eigenheiten einhergehen. Dadurch konzentrieren sich die Schülerinnen und Schüler auf den Versuch als

solches. Ablenkungen, die mit dem eigentlichen Experiment nichts zu tun haben, sollen vermieden werden. Die Simulation umfasst die Physik hinter dem Experiment, so dass die Schülerinnen und Schüler nicht auf einen bestimmten Versuchsaufbau beschränkt sind. Dies lädt zum freien Experimentieren und Ausprobieren ein. So wird beispielsweise der Laserstrahl bis zur nächsten Kollision mit einem Übergang zwischen zwei Medien unterschiedlicher optischer Dichte angezeigt, dort Brechungs- und Reflexionswinkel berechnet und der Strahl entsprechend weitergeführt.

Sehr hoher Immersionsgrad wird durch den Einsatz von Augmented Reality (AR) erreicht. Die einzig notwendige Hardware beschränkt sich auf „Marker“ zum Preis eines Blattes Papier. Die Applikation läuft plattformunabhängig auf Smartphones und Tablet-PCs aller Betriebssysteme. Um einer vorherigen Installation mit all ihren Schwierigkeiten wie Platzbedarf und Rechten auf dem mobilen Endgerät zu entgehen, wurde sie webbasiert implementiert, läuft demnach in einem beliebigen Browser nach Aufruf der URL. Sie ist aus dem Stegreif einsetzbar und steht sowohl in der Schule als auch im häuslichen Umfeld kostenlos zur Verfügung. Einzige Voraussetzung ist ein Internetzugang, wobei die übertragene Datenmenge sehr gering ist und nur zu Beginn heruntergeladen wird. Ein weiterer Mehrwert des digitalen Experiments ist die Möglichkeit, Grenzen der Physik zu verschieben. Im Gegensatz zur Realität kann hier während des Versuchs beispielsweise die Brennweite einer Linse oder der Brechungsindex eines Wasserbeckens beliebig im realistischen, wie auch im unrealistischen Bereich angepasst werden.

Die Schülerinnen und Schüler erhalten Kärtchen (sogenannte „Marker“), die von der Applikation erkannt

werden. Darüber blendet die App Gegenstände wie Laser, Linsen etc. ein. Diese interagieren miteinander, so dass das Experiment rein virtuell stattfindet. Dadurch, dass die Marker auf dem Tisch hin- und hergeschoben werden können, erfährt die Nutzung eine haptische Komponente, die den Immersionsgrad deutlich fördert. Je nach Objekt werden Buttons eingebendet, die die Manipulation weiterer Parameter ermöglichen.

3. Funktionsumfang

Zum Experimentieren wurde eine Reihe von ausdrückbaren Markern entwickelt, auf denen Gegenstände eingebendet werden. Der aktuelle Entwicklungsstand umfasst folgende virtuelle Gegenstände:

- a) Erste gefahrlose Schattenversuche lassen sich mit den virtuellen Kerzen durchführen, deren Helligkeit und Flammenfarbe während des Versuchs einstellbar sind. Die eingestellte Flammenfarbe verknüpft zugleich interdisziplinäre Kenntnisse der aus der Chemie charakteristischen Flammenfärbung durch bestimmte Elemente.
- b) Sonnenauf-, Sonnenuntergang, Mondphasen, Sonnen- und Mondfinsternis sind Beispiele aus der Lebenswelt der Schülerinnen und Schüler, die eine willkommene Anwendung des Gelernten aus dem Bereich Lichtquellen und Schatten anbieten. Die Animation des Mondes um die Erde kann pausiert werden, um die Phänomene genauer zu analysieren. Die Größenverhältnisse sind nicht maßstabsgetreu, ein solcher Modus ist später aber denkbar und würde neue Möglichkeiten eröffnen.
- c) Der Zylinder stellt ein Hindernis für Schattenexperimente mit einer oder mehreren Kerzen und deren Kern- und Halbschatten dar.
- d) Auf dem Schirm werden beleuchtete und verschattete Bereiche sichtbar. Für viele Schülerinnen und Schüler überraschend sind dabei die Halbschatten bei Versuchen mit Kerzen verschiedener Farben.
- e) Grundversuche der geometrischen Strahlenoptik benötigen einen Laserstrahl. Dieser ist in dieser Simulation auch ohne Nebel durchgehend sichtbar. Es lassen sich ein, drei oder fünf parallele Laserstrahlen einblenden. Die Laserstrahlen können in ihrer Farbe verändert werden. Zusätzlich steht weißes Licht kontinuierlichen Spektrums zur Auswahl.
- f) Ebenso steht ein einfacher Spiegel bereit, der an beliebigen Stellen in den Strahlenverlauf positioniert werden kann. Vorgesehen ist die Einblendung von Einfallslot und Winkelscheibe.
- g) Ebene Flächen erleichtern den Einstieg in die Lichtbrechung, bevor es an komplexere Systeme wie Linsen geht. In der Grundkonfiguration handelt es sich hierbei um einen Glasquader, wobei

dessen Materialeigenschaften verändert werden können. Ebenso kann beeinflusst werden, ob sowohl Brechung als auch Reflexion angezeigt werden sollen oder nur eins dieser Phänomene. Die Anzeige des Einfallslotes sowie eine virtuelle Winkelscheibe sind in Planung.

- h) Auch eine Sammel- und Zerstreuungslinse liegen dem virtuellen Experimentierkasten bei. Wie bereits beschrieben, lässt sich die Brennweite während des Versuchs verändern.
- i) Neben dem Quader stellt das Prisma ein interessantes Objekt zur Strahlmanipulation dar. Eine unterschiedliche Brechung je nach Wellenlänge des Einfallstrahls ist in Planung.
- j) Die meisten Experimente im Schulkontext betrachten das Verhalten eines Lichtstrahls von Luft kommend in einen Körper höherer optischer Dichte. Ein Wasserbecken mit einer Luftlinse dreht dies um und erzeugt kognitive Konflikte, die zu einer weiteren Vertiefung des physikalischen Verständnisses führen sollen.
- k) Eine weitere lebensnahe Anwendung des Gelernten ist die Abbildung im Auge. Ein Marker stellt ein halbes Auge dar, der andere Marker einen kleinen Baum, der zusätzlich ins Auge projiziert wird. Des Weiteren lässt sich eine Fehlsichtigkeit simulieren, die den Augapfel verlängert oder verkürzt. Durch eine zuschaltbare Brille und variabel einstellbare Brennweite der Brille können die Schülerinnen und Schüler die Fehlsichtigkeit korrigieren und die Projektionsebene wieder auf die Netzhaut legen.



Abb. 1: Marker und Übungskärtchen (eigene Darstellung)

4. Übungskärtchen

Die Durchführung größerer Experimente mit Messreihen und dem Erlernen ausführlicher Dokumentation ist nicht der Anspruch dieser spontan einsetzbaren Simulation. Es wurden aber 12 Übungsaufgaben in Form von Karten entwickelt, auf deren Vorderseite eine Kurzanleitung und auf der Rückseite Lösungshinweise gegeben sind. Über den aufgedruckten QR-Code gelangt man zur WebAR-Applikation. Die benötigten Marker sind leicht erkennbar. Die Karten können digital oder ausgedruckt verwendet werden. Die Themen reichen dabei von Schatten über die

Anwendung bei Mondphasen, bis hin zur Fehlsichtigkeit des Auges.

5. Forschungsinteresse

Die Art der Applikation, eine webbasierte AR-Simulation, ist in ihren Möglichkeiten bisher weitestgehend unerforscht. Daher liegt der Interessenschwerpunkt darauf, wie Lehrende und Lernende die WebApp einsetzen und bewerten. Ebenso wird untersucht, ob die Anreicherung des eigenen Unterrichts mit der WebAR-App einen Einfluss auf den Fachwissenszuwachs sowie affektiv-motivationale Faktoren hat. Dafür wird mit einer Kontrollgruppe verglichen, wobei klar ist, dass die Anzahl der Einflussfaktoren hoch ist. Zuletzt wird bewertet, wie die technische Eignung für das praktische Umfeld in Schulen ist, in denen sowohl Tablet-PCs wie auch Smartphones verschiedener Betriebssysteme genutzt werden.

6. Erster Einblick in die Praxiserprobung

Die folgenden Auswertungen beruhen auf den Daten mit Stand 25. Mai 2025. Diese entwickeln sich stetig weiter, da die Studie zum Zeitpunkt der Niederschrift dieses Beitrags noch nicht abgeschlossen war. Dennoch bieten sie bereits interessante Einblicke.

Bisher haben 599 Schülerinnen und Schüler die Vortests durchlaufen, davon knapp zwei Drittel Mädchen. Das Durchschnittsalter der Kinder beträgt 13,6 Jahre, 26 % besuchen die 7. und 74 % die 8. Klasse. Aktuell sind die Realschulen mit einem Anteil von 9,3 % noch unterrepräsentiert. In den Gymnasien besuchen 44 % der teilnehmenden Schülerinnen und Schüler den naturwissenschaftlich-technologischen Zweig, ebenso sind alle weiteren Ausbildungsrichtungen vertreten.

Lediglich 2,6 % haben kein Smartphone, die überwiegende Mehrheit gab an, bereits seit der 5. Klasse eines zu besitzen. Über die Hälfte der Jugendlichen hat noch keine Erfahrung mit Augmented Reality gemacht. Wer bereits Erfahrung besitzt, sammelte diese zumeist im privaten Bereich, aber auch im schulischen Umfeld wurde bei etwa 15 % der Schülerinnen und Schüler bereits mit AR gearbeitet.

Die technische Ausstattung der Schulen weist flächendeckendes WLAN und überwiegend Zugang zu Tablet-PCs auf (größtenteils in Form von iPad-Koffern, teils auch als 1:1-Ausstattung, so dass die Schülerinnen und Schüler dauerhaft mit einem eigenen Tablet-PC arbeiten). Es ist anzunehmen, dass durch die freiwillige Teilnahme an der Studie hierbei durchaus eine Positivauswahl getroffen wurde, wobei durch das Programm „Digitale Schule der Zukunft“ mittlerweile viele Schulen ein sehr gutes Ausstattungsniveau erreicht haben. [3]

Die Lehrkräfte, ebenfalls zu etwa zwei Dritteln weiblich, sind zwischen 28 und 57 Jahren alt und können im Mittel 13 Jahre Unterrichtserfahrung vorweisen. Ein Drittel der Lehrkräfte hat vor der Studienteilnahme noch gar keine Erfahrung mit Augmented

Reality gesammelt, etwa die Hälfte hat AR bereits privat und ein Drittel auch schon in der Schule eingesetzt.

Die teilnehmenden Klassen befinden sich größtenteils in der Praxisphase, lediglich 14 % haben bereits die Nachttestphase erreicht. Dennoch lassen sich bereits einige Beobachtungen anstellen:

Die Lehrkräfte sind völlig frei in der Einbindung der Applikation in ihren Unterricht. Sie sollen sie wie einen „digitalen Schülerübungskasten“ verwenden, den man dann aus dem Regal holt, wenn es sinnvoll erscheint. Es wurden alle Marker zu relativ ähnlichem Anteil genutzt. Der LaserBox-Marker wird in verschiedenen Kombinationen benötigt, weshalb es zu erwarten war, dass dieser höhere Nutzungszahlen hat. Das Auge mit dem Gegenstand „Blume“ wurde noch nicht so häufig genutzt. Dies lässt sich dadurch erklären, dass dieses Thema als Anwendung des Gelernten erst zum Ende der Optik unterrichtet wird. Bei diesem Thema sind viele der Klassen jedoch zum Verfassungszeitpunkt dieses Artikels noch nicht angekommen.

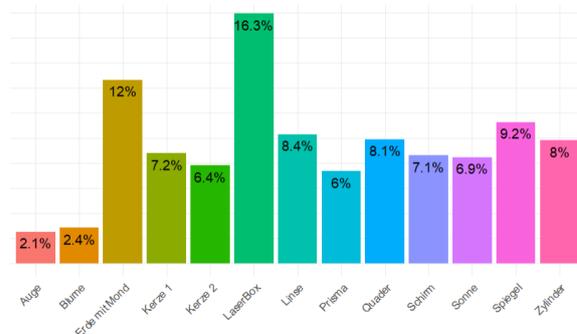


Abb. 2: Anteilige Häufigkeit der Nutzung der einzelnen Marker durch die Schülerinnen und Schüler (eigene Darstellung)

Die Lehrkräfte setzten die WebApp primär zu Beginn oder im Verlaufe eines Themas, seltener aber am Ende ein. Innerhalb einer Stunde zeigt sich eine leichte Tendenz zur Mitte, sie wird aber auch fast genauso häufig zum Einstieg oder zum Ende hin verwendet.

In fast einem Drittel der Einsätze erhofften sich die Lehrkräfte eine Erhöhung der Motivation der Schülerinnen und Schüler, in etwa einem Viertel die Auflockerung des Unterrichts durch den Methodenwechsel. Eher seltener war das Ziel die kognitive Vorentlastung eines Realexperiments.

Zumeist wurde das Optiklabor in Zusammenhang mit einem Realexperiment eingesetzt, das überwiegend in derselben Stunde stattfand. In 16 % der durchgeführten AR-Einsätze wurde jedoch ein Realexperiment ersetzt. Wenn das Realexperiment unter anderen Umständen nicht hätte stattfinden können, ist dies positiv zu sehen, da dann eine neue Experimentiergelegenheit geschaffen wurde. Unglücklich wäre es jedoch, wenn die Schülerinnen und Schüler dadurch seltener mit Realexperimenten arbeiten würden.

In gut 70 % der AR gestützten Unterrichtsstunden wurden Tablet-PCs eingesetzt, davon wiederum in knapp zwei Dritteln Leihgeräte der Schule.

Zu allen Themen der Optik wurde das Optiklabor bereits verwendet. Auffallend oft dabei zur Wiederholung der Grundlagen aus der vorangegangenen Jahrgangsstufe und bei den Themen Reflexion und Lichtbrechung.

Sehr positiv berichteten die Lehrkräfte über den webbasierten Ansatz und die damit entfallende Installation einer App. Ebenso gefiel die große Auswahl an Markern und Übungen. Die für die Studie entwickelte Onlineplattform kommt ebenso gut an wie die ansprechenden Visualisierungen insbesondere bei Erde, Sonne & Mond sowie dem Auge im Rahmen der Fehlsichtigkeit.

Vereinzelt gab es kritische Rückmeldungen zum Tracking, das je nach verwendeter Kamera etwas wackelig sein kann. Insbesondere die verschiedenen Kamerablickwinkel („field of view“) gestalteten das Experimentieren teils etwas schwieriger. Prinzipiell gilt, je weitwinkliger die Kamera ist, desto einfacher fiel es den Schülerinnen und Schülern. Als Lösung wird aktuell geprüft, ob eine Kameraauswahl implementiert werden kann, da die meisten Smartphones Kameras verschiedener Blickwinkel verbaut haben und die Standardauswahl nicht immer mit dem Weitwinkelobjektiv übereinstimmt.

7. Ausblick

Zunächst gilt es, die teilnehmenden Lehrkräfte zu unterstützen und für einen reibungslosen Ablauf zu sorgen. In den Sommerferien wird die WebApp im Sinne des Design-Based-Research weiterentwickelt und die Erfahrungen und Wünsche der Lehrkräfte implementiert. [4] Danach ergibt sich noch ein Zeitfenster zu Schuljahresbeginn, die Applikation noch einmal zu testen. Ebenso wäre dies eine Gelegenheit, die Kontrollgruppe auszubauen. In Einzelfällen werden zudem Interviews geführt, um weitere Erkenntnisse zu erlangen, die aus den eingesetzten Testinstrumenten noch nicht hervorgingen. Im Anschluss erfolgt die tiefergehende Auswertung der Daten, so dass die Ergebnisse im Frühjahr 2026 veröffentlicht werden können. Ziel wird sein, mehr über die praktische Eignung einer solchen AR-Simulation für den Physikunterricht zu erfahren, im Sinne des Design-Based-Research ein gutes Werkzeug für den Unterricht zu implementieren und Impulse für weiterführende Forschung zu skizzieren. Die Applikation in ihrer erprobten, beforschten und stetig weiterentwickelten Version soll auch über die Studie hinaus zur Verfügung gestellt werden.

8. Kontext PUMA

Der Lehrstuhl für Physik und ihre Didaktik der Universität Würzburg unter Prof. Dr. Thomas Trefzger widmet sich in mehreren Projekten der Augmentierung von Physikunterricht. [5] Dabei steht der Einfluss von Augmented Reality auf die Lernenden im

Vordergrund. So wurden neben dem Optiklabor auch ein Magnetlabor [6] und ein Spannungslabor [7] entwickelt, die sich bereits in der Datenauswertung befinden. Bei diesen Projekten wurden native Applikationen mittels Unity implementiert, die Realexperimente graphisch und mit Zusatzinformationen unterstützen.

9. Literatur

- [1] Perkins, Katherine & Adams, Wendy & Dubson, Michael & Finkelstein, Noah & Wieman, C. & LeMaster, Ron. (2006). PhET: Interactive Simulations for Teaching and Learning Physics. *The Physics Teacher*. 44. S. 18-23.
DOI: <https://doi.org/10.1119/1.2150754>
- [2] Jaakkola, T., Nurmi, S. and Veermans, K. (2011), A comparison of students' conceptual understanding of electric circuits in simulation only and simulation-laboratory contexts. *J. Res. Sci. Teach.*, 48: 71-93.
DOI: <https://doi.org/10.1002/tea.20386>
- [3] Bayerisches Staatsministerium für Unterricht und Kultus (Hrsg.). *Digitale Schule der Zukunft*. URL: <https://www.km.bayern.de/digitale-schule-der-zukunft/allgemein> (Stand 5/2025)
- [4] Reinmann, Gabi (2005). Innovation ohne Forschung? Ein Plädoyer für den Design-Based Research-Ansatz in der Lehr-Lernforschung. In: *Unterrichtswissenschaft* 33, S. 52-69.
DOI: <https://doi.org/10.25656/01:5787>
- [5] Frank, F., Kraus, S., Kreikenbohm, A., Schwanke, H. Stolzenberger, C. Trefzger, T. (2024). Das Projekt PUMA (Physikunterricht Mit Augmentierung). In: *Beiträge zur Frühjahrstagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft (DPG) in Hannover 2023*. S. 277-279. URL: <https://ojs.dpg-physik.de/index.php/phydid-b/article/view/1363>
- [6] Schwanke, H. Kreikenbohm, A., Trefzger T. (2024). Ein AR-Lehr-Lern-Labor zum Themengebiet (Elektro-) Magnetismus in der Sekundarstufe I. In: *Beiträge zur Frühjahrstagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft (DPG) in Hannover 2023*. 309-312.
URL: <https://ojs.dpg-physik.de/index.php/phydid-b/article/view/1359/1578>
- [7] Stolzenberger, C., Frank, F., Trefzger, T. (2024). Theorie trifft Realexperiment - Stromkreise verstehen mit der AR-App "PUMA : Spannungslabor".
DOI: https://doi.org/10.18420/avril2024_01

Smartphone-gestützte Experimente zur Quantenphysik

- Motivation, Vorstellung und Entwicklungsprozess -

Johannes Schlaf*, Dominik Dorsel*, Sebastian Staacks⁺, Christoph Stampfer⁺, Heidrun Heinke*

*I. Physikalisches Institut IA, RWTH Aachen University

⁺II. Physikalisches Institut A, RWTH Aachen University

schlaf@physik.rwth-aachen.de, staacks@physik.rwth-aachen.de

Kurzfassung

Gängige Schulexperimente zur Quantenphysik sind häufig komplex und/oder stellen eine Art „Black Box“ für SchülerInnen dar, welche nicht vollständig verstanden wird. Zudem wird typischerweise kostenintensives Equipment benötigt, sodass anstelle von Schülerexperimenten häufig nur Simulationen durchgeführt werden. Aus diesem Grund wurden Schülerexperimente zur Quantenphysik und Quantentechnologie mit übersichtlichen, leicht verständlichen Aufbauten entwickelt, welche das schülereigene Smartphone mithilfe der App phyphox für die Messdatenerfassung und -darstellung nutzen. Hierbei handelt es sich (i) um ein Experiment zur Bestimmung des Planck'schen Wirkungsquantums sowie (ii) um ein Analogieexperiment zur quantenkryptographischen Übertragung von Schlüsseln mithilfe des BB84-Protokolls. Dabei wurde das Experiment zur h-Bestimmung als einfach zu realisierendes DIY-Projekt ausgelegt, was nicht nur zu niedrigen Kosten führt, sondern auch zusätzliches didaktisches Potential birgt.

Beide Experimente wurden sowohl mit Studierenden als auch mit SchülerInnen im Einsatz evaluiert und weiterentwickelt.

1. Motivation

Moderne Smartphones sind mit einer Vielzahl interner Sensoren ausgestattet, die durch entsprechende Apps wie z.B. phyphox ausgelesen werden können [1][2][3]. Diese Sensoren, kombiniert mit der kompakten Größe der Geräte, bieten vielfältige und häufig sehr niederschwellige Möglichkeiten zum Experimentieren. Beispiele hierfür sind die Messung der Zentripetalbeschleunigung in einer Salatschleuder oder die Simulation eines Sonars durch Lautsprecher und Mikrofon [4]. Für die Nutzung im Unterricht bieten Smartphones zudem den entscheidenden Vorteil, dass in Deutschland 93 % aller Jugendlichen zwischen 12 und 19 Jahren ein solches Gerät besitzen und somit in jeder Klasse / jedem Kurs hinreichend viele mobile Messinstrumente zur Verfügung stehen [5].

Die App phyphox wird an der RWTH Aachen entwickelt und bietet neben der einfachen Erfassung und grafischen Darstellung von Messdaten auch kontextspezifische Experimente wie die Bestimmung der Frequenz eines Federpendels [4]. Zudem können externe Sensormodule über Bluetooth Low Energy (BLE) in phyphox-Experimente integriert werden, was die Möglichkeit eröffnet, Sensoren auch in Aufbauten zu verwenden, die für Smartphones nicht geeignet sind oder auf Messdaten zugreifen müssen, die von den geräteinternen Sensoren nicht erfasst werden. Mit Vorkenntnissen in den Softwareplattformen Arduino oder MicroPython für Mikrocontroller können mithilfe der Bibliothek phyphoxBLE solche Sensormodule sogar selbst erstellt bzw. nach den eigenen Wünschen programmiert werden [6]. Dies

schafft wiederum die gerade für den MINT-Unterricht interessante Option, externe Sensormodule als DIY-Projekte (DIY = do it yourself) zu realisieren [7]. Diese sind in der Regel deutlich kostengünstiger als kommerzielle Lehrmittel und bieten auch die Möglichkeit, Reparaturen eigenständig durchzuführen. Zudem eröffnen sie SchülerInnen auch vielfältige weitere Lerngelegenheiten.

Im Rahmen des Zusammenbaus der Sensormodule können SchülerInnen z.B. praktische Erfahrungen mit Formgebungsverfahren wie 3D-Druck und mit der Programmierung von Mikrocontrollern sammeln. Diese aktiv-handwerklichen und aktiv-kognitiven Tätigkeiten können sich auch positiv auf das Interesse und Engagement der SchülerInnen auswirken [8].

Im schulischen Kontext existiert ein Mangel an Realexperimenten zur Quantenphysik, was in der Unterrichtspraxis zu einer gehäuften Nutzung von Simulationen führt [9]. Dies steht jedoch im Widerspruch zu den Empfehlungen des Kernlehrplans Physik für die Oberstufe des Landes Nordrhein-Westfalen, welcher Realexperimenten ausdrücklich den Vorzug gegenüber Simulationen gibt [10]. Darüber hinaus kann der Einsatz von Simulationen für ein niedrigeres Schülerinteresse sorgen [8]. Oft sind typische Experimente wie z.B. zum Photoeffekt, die auch im Kernlehrplan genannt werden, relativ komplex und mit hohen Kosten der Aufbauten verbunden, was ihre Nutzung häufig auf den Einsatz als Demonstrationsexperimente beschränkt. Gleichzeitig nennt der Kernlehrplan jedoch das eigenständige Experimentieren der SchülerInnen als Teil der zu erwerbenden Sachkompetenz

[10]. Vor diesem Hintergrund besteht ein Bedarf an geeigneten Schülerexperimenten zur Quantenphysik. Das Ziel des Projekts ist es, das bestehende Ensemble der Experimente zur Quantenphysik für die Physiklehre durch niederschwellig einsetzbare Schülerexperimente zu erweitern. Ein zentraler Ansatzpunkt dabei ist der Einsatz des Smartphones als breit verfügbares und vielseitig einsetzbares Messinstrument. Bei der Konzeption der Experimente wurde zudem darauf geachtet, dass sie auch auf Tablets durchführbar sind, um eine möglichst breite Zugänglichkeit im schulischen Umfeld sicherzustellen. Die Nutzung der App phyphox als Datenschnittstelle ermöglicht dabei die Integration externer Sensormodule. Im Rahmen dieses Projekts wurden bislang zwei Schülerexperimente entwickelt, die in den folgenden beiden Abschnitten vorgestellt werden. Diese Experimente wurden für den Einsatz in der Oberstufe weiterführender Schulen entwickelt, sind aber auch für die Physikausbildung an Hochschulen geeignet.

2. Experiment zur Bestimmung des Planck'schen Wirkungsquantums

2.1. Grundlegende Funktionsweise

Das Experiment nutzt den Zusammenhang zwischen der Photonenenergie des von Leuchtdioden (LEDs) emittierten Lichts und der Schwellenspannung der LEDs. Mithilfe des entwickelten Aufbaus werden die Schwellenspannungen verschiedener LEDs mit bekannter Frequenz des emittierten Lichts ermittelt. Hierzu wird eine Ausgleichsgerade durch den lokal linear annäherbaren Bereich der Kennlinie der LED gelegt. Deren Nullstelle entspricht näherungsweise der Schwellenspannung. Um das Experiment anschaulicher zu gestalten, wird die seit kurzem verfügbare Möglichkeit genutzt, in phyphox auf die Kamera des Smartphones oder Tablets zuzugreifen und damit statt der Strom-Spannungs-Kennlinie der LED eine Kennlinie ihrer Leuchtdichte (Lichtstärke pro Fläche) über der angelegten Spannung aufgenommen. Für hinreichend kleine Ströme entspricht diese Kennlinie bei vielen LEDs bis auf einen Vorfaktor näherungsweise der Strom-Spannungs-Kennlinie und ermöglicht deshalb in gleicher Weise die Ermittlung der Schwellenspannung [11].

Das Planck'sche Wirkungsquantum wird als Steigung einer Ausgleichsgeraden in der Auftragung der Energien der Photonen, die aus der jeweiligen Schwellenspannung ermittelt werden, über der zugehörigen Lichtfrequenz bestimmt [12].

Der Aufbau ist in Abbildung 1a in Funktion und in Abbildung 1b mit wichtigen Einzelteilen zu sehen. Er besteht aus:

- einem Smartphone, auf dem die App phyphox installiert ist,
- der mit phyphox über BLE koppelbaren sogenannten phyphox:h-Box, welche eine



a) Aufbau während einer Messung. Eigene Darstellung.



b) Die zu fertigenden Module des Aufbaus. (1) LED-Einsätze. (2) phyphox:h-Box zur Spannungsausgabe. (3) Stabilisierungshilfe. (4) Abdunklungsbox mit weißem Reflexionsmaterial. Eigene Darstellung.

Abb. 1: Aufbau zur Bestimmung des Planck'schen Wirkungsquantums.

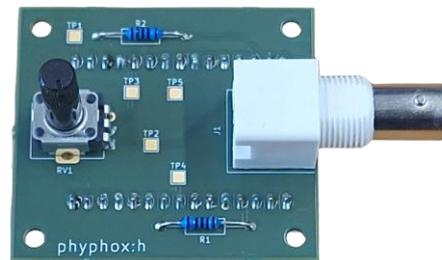


Abb. 2: Fertig gelötete Platine der phyphox:h-Box. Eigene Darstellung.

variable Spannung ausgibt und den momentanen Spannungswert an phyphox sendet,

- sowie einer sogenannten Abdunklungsbox, in die austauschbare LED-Einsätze eingeführt werden können.

Die phyphox:h-Box wird von dem Smartphone mit Spannung versorgt und kann variable Spannungen von 0 V bis 3,1 V ausgeben. In ihr ist ein in Arduino programmierter BLE-fähiger ESP32-Mikrocontroller verbaut. Die Variation der Spannung erfolgt wahlweise über einen Drehknopf oder über phyphox.

Die Abdunklungsbox wird an die phyphox:h-Box angeschlossen und so mit Spannung versorgt. Das Smartphone wird unter Nutzung der Stabilisierungshilfe so auf der Abdunklungsbox platziert, dass sich die Hauptkamera über dem in Abbildung 1b sichtbaren weißen Reflexionsmaterial befindet. Über die Kamera wird in phyphox die Beleuchtungsstärke am Reflexionsmaterial gemessen, welche proportional zur Leuchtdichte der LED ist (siehe auch Abschnitt 2.2).

2.2. Designentscheidungen

Der DIY-Ansatz wurde gewählt, um eine möglichst hohe Verfügbarkeit und einen vergleichsweise niedrigen Preis zu erzielen. Zudem können SchülerInnen so auch an zusätzliche Kompetenzen wie die Programmierung, den 3D-Druck und das Lötten herangeführt werden.

Dementsprechend wurde der Aufbau so konzipiert, dass die Fertigung auch Lehrkräften und SchülerInnen mit wenig oder gar keiner Vorerfahrung bezüglich des Lötens oder der Programmierung von Mikrocontrollern möglich ist. Um das Lötten zu vereinfachen, werden auf der in der phyphox:h-Box verbauten Platine ausschließlich Durchsteckbauteile verwendet (siehe Abbildung 2). Die Anzahl der Lötunkte ist zudem vergleichsweise niedrig. Eine detaillierte Bauanleitung sowie der für die Programmierung des verbauten Mikrocontrollers notwendige Code werden kostenlos online zur Verfügung gestellt.

Als Mikrocontroller wurde ein ESP32 gewählt, da dieser einfach in Arduino programmierbar ist und zudem über einen DAC (Digital Analog Converter) verfügt. Dieser ist für diesen Versuch essentiell, da ohne DAC ausgegebene Spannungen lediglich Effektivspannungen eines pulsweitenmodulierten, digitalen Signals darstellen, mit denen sich keine Schwellenspannung bestimmen lässt.

Um Messungen auch in nicht abgedunkelten Räumen zu ermöglichen bzw. die Notwendigkeit der Korrektur eines Offsets in der LED-Kennlinie zu umgehen, wurde eine Abdunklungsbox konzipiert, welche durch das auf der Box platzierte Smartphone vollständig abgedeckt wird. Im Rahmen mehrerer Testläufe (siehe Abschnitt 3) wurde dabei ein Design entwickelt, bei dem die Abdunklungsbox selbst mit Spannung versorgt wird und in welche verschiedene LED-Einsätze eingespannt werden können (siehe Abbildung 3). Um eine mechanische Überbelastung der elektrischen Kontaktstellen zu vermeiden, werden die Anschlusskabel durch eine Zugentlastung geführt.

Unter den eingeschobenen LEDs befindet sich ein weißes Reflexionsmaterial. Dieses wurde eingefügt, weil beim direkten Messen der Leuchtdichte von LEDs mit der Kamera häufig auch bei sehr geringen Leuchtdichten in einigen Bildbereichen schon eine Überbelichtung auftritt. Da eine Überbelichtung bei der digitalen Kamera eine Sättigung von Pixeln bedeutet, kann sie zu einer Verfälschung der Kennlinie führen und ist somit während der Messung zu vermeiden. Deshalb wird in der jetzt realisierten Konfiguration die Beleuchtungsstärke des angestrahlten Reflexionsmaterials gemessen.

Um eine möglichst hohe Flexibilität beim Einsatz der Experimentiermaterialien zu gewährleisten, wurde für die Spannungssteuerung die phyphox:h-Box als separates Modul konzipiert. Zum einen können sich Lehrkräfte so aussuchen, ob sie den vollständigen Aufbau fertigen oder nur die Abdunklungsbox bauen und einen Mikrocontroller ohne Gehäuse zur Span-



Abb. 3: Unterseite der Abdunklungsbox mit eingespanntem LED-Einsatz. Eigene Darstellung.

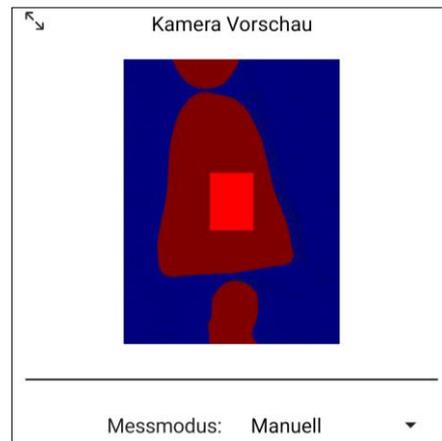


Abb. 4: Kameravorschau mit der Anzeige überbelichteter Bereiche (rot). Eigene Darstellung.

nungssteuerung nutzen. Zum anderen kann so die phyphox:h-Box auch noch für weitere Projekte unabhängig von der Abdunklungsbox genutzt werden (siehe auch Abschnitt 6). Aus diesem Grund wurde hier als Anschluss auch eine BNC-Buchse gewählt.

Die zu fertigenden Module wurden als 3D-Druck-Bauteile konzipiert, da so die notwendigen Geometrien zur Anordnung und Fixierung der Komponenten in einem Druck generiert werden können. Dabei ist nur wenig Nachbearbeitung wie z.B. das Entfernen von Stützstrukturen erforderlich. Zudem wird der 3D-Druck im Schulkontext zunehmend relevanter, wie z.B. die Herausgabe einer entsprechenden Handreichung durch das Landesinstitut für Schule des Landes Nordrhein-Westfalen belegt [13].

2.3. Umsetzung in phyphox

Der Aufbau verwendet ein speziell konzipiertes phyphox-Experiment, welches über Bluetooth von der phyphox:h-Box heruntergeladen werden kann. In der Bedienoberfläche des phyphox-Experiments finden die NutzerInnen drei Reiter, die zu unterschiedlichen Phasen des Experiments gehören.

Im ersten Reiter befindet sich eine Kameravorschau, welche zur korrekten Platzierung der Kamera verwendet wird. Die Vorschau nutzt den phyphox-eigenen Falschfarbenmodus, in dem über- und unterbelichtete Bereiche rot bzw. blau angezeigt werden (siehe Abbildung 4). Zudem lässt sich in dem Reiter der Messmodus einstellen, d.h. ob die phyphox:h-Box über den manuellen Drehregler oder die App gesteuert werden soll.

Der zweite Reiter dient der Bestimmung der Schwellenspannung (siehe Abbildung 5). Hier wird die aufgenommene Kennlinie der LED aufgetragen. Anschließend muss ein zu berücksichtigender Intensitätsbereich für die Platzierung der Ausgleichsgeraden angegeben werden, welche automatisch berechnet und aufgetragen wird. Als Schwellenspannung wird die Nullstelle der Ausgleichsgeraden ausgegeben. Die Schwellenspannung kann zusammen mit der zugehörigen Wellenlänge abgespeichert und die aufgenommene Kennlinie kann gelöscht werden.

Die abgespeicherten Datenpaare werden im dritten Reiter dargestellt (siehe Abbildung 6). Sie werden zudem in Photonenenergie-Frequenz-Wertepaare umgerechnet und mit einer durch den Ursprung verlaufenden Ausgleichsgerade aufgetragen. Die Steigung der Ausgleichsgerade entspricht nach den theoretischen Überlegungen dem Planck'schen Wirkungsquantum. Versehentlich gelöschte oder durch einen möglichen Abbruch der Bluetooth-Verbindung verloren gegangene Datenpaare (siehe Abschnitt 5) können manuell durch Angabe von Wellenlänge und Schwellenspannung wieder hinzugefügt werden.

Eine Auftragung unter Berücksichtigung der Messunsicherheiten ist in phyphox derzeit nicht möglich. Sollen im Unterricht die Unsicherheiten im Experiment thematisiert werden, muss eine manuelle Auftragung der Datenpaare wie in Abbildung 7 erfolgen. Der dort erhaltene Wert stimmt im Rahmen der Messunsicherheiten mit der Planck-Konstante überein und ist repräsentativ für die mit dem hier gezeigten Aufbau erzielbaren Ergebnisse.

3. Analogieexperiment zum BB84-Protokoll

3.1. Hintergrund

Das BB84-Protokoll ist ein Verfahren zum quantenkryptographischen Austausch digitaler Schlüssel zwischen zwei Akteuren. Das Verfahren nutzt Einzelphotonen in vier verschiedenen, um 45° bzw. 90° paarweise zueinander gedrehten Polarisationszuständen. Die Akteure werden in der Fachliteratur üblicherweise als Alice (Sender) und Bob (Empfänger) bezeichnet. Alice schickt Einzelphotonen mit zufälligen Polarisationsrichtungen an Bob, welcher die Polarisationen in zufällig gewählten Messbasen misst. Aus den Messungen kann ein Schlüssel generiert werden [14]. Da Einzelphotonen weder aufteilbar noch kopierbar sind, muss ein Spitzel (typischerweise Eve, abgeleitet vom engl. „eavesdropping“) die von Alice gesendeten Einzelphotonen abfangen und selbst Einzelphotonen an Bob schicken. Hierdurch wird der Übertragungsvorgang gestört, sodass kein funktionierender Schlüssel generiert werden kann.

Da das BB84-Protokoll eine Möglichkeit darstellt, auch in Zeiten von Quantencomputern eine sichere Verschlüsselung zu gewährleisten, lässt es sich als relevante Zukunftstechnologie im Physikunterricht thematisieren [10][14]. Aufgrund der sehr hohen Kosten und der anspruchsvollen Handhabung von

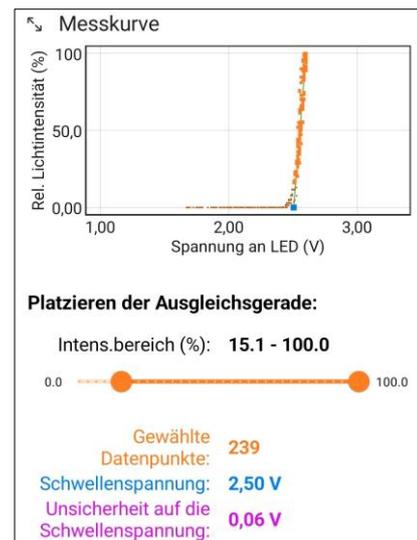


Abb. 5: Bestimmung der Schwellenspannung einer LED in phyphox. Eigene Darstellung.

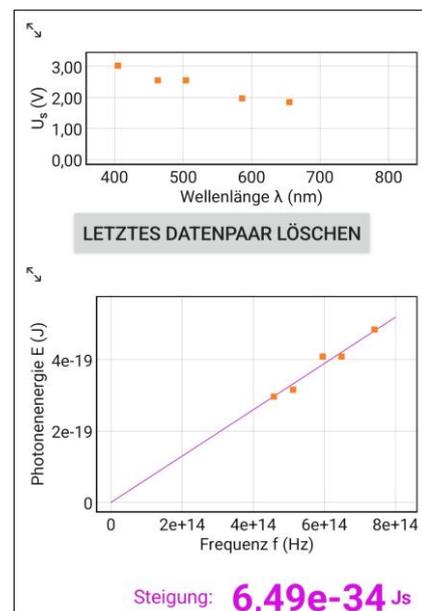


Abb. 6: Exemplarische Bestimmung des Planck'schen Wirkungsquantums in phyphox anhand der Schwellenspannungen fünf verschiedener LEDs. Eigene Darstellung.

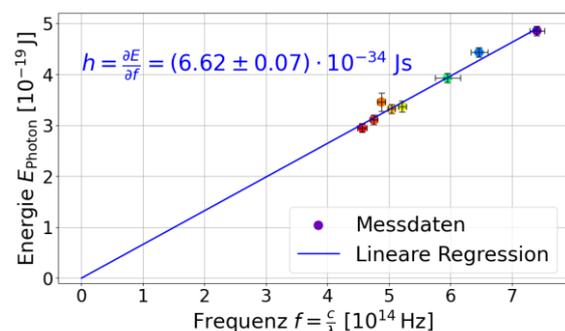


Abb. 7: Bestimmung des Planck'schen Wirkungsquantums mit aus dem Aufbau generierten Messdaten. Eigene Darstellung.

Einzelphotonenquellen werden zur Erläuterung des BB84-Protokolls (nicht nur im Schulkontext) meist Analogieexperimente eingesetzt [15].

3.2. Umsetzung

In dem konzipierten Analogieversuch werden die Polarisationszustände durch vier verschiedene, in phyphox angezeigte Farben symbolisiert. Für den Versuch wird kein separater Aufbau benötigt, sondern lediglich zwei bis drei Smartphones pro Schülergruppe. Für jede der beteiligten Rollen (Alice, Bob, Eve) existiert eine separate phyphox-Experimentkonfiguration:

Im Alice-Experiment (siehe Abbildung 8) wird automatisch ein zufälliger Polarisationszustand erzeugt. Die hierfür notwendigen Zufallszahlen stammen aus dem weißen Rauschen des Beschleunigungssensors. Die dem Polarisationszustand zugeordnete Farbe wird zur Kommunikation mit Bob in einer Falschfarbendarstellung angezeigt.

Im Bob-Experiment kann die Farbe mithilfe der Smartphone-Kamera eingelesen werden (siehe Abbildung 9). Der Polarisationszustand wird anschließend über eine zufällige Messbasis „gemessen“. Auch hier stammen die für den „Messvorgang“ benötigten Zufallszahlen aus dem Rauschen des Beschleunigungssensors.

Das Eve-Experiment vereint die Funktionalitäten von Alice und Bob. Es misst Polarisationszustände und gibt den gemessenen Zustand anschließend über ein Farbsignal an Bob weiter.

Die das Experiment durchführenden SchülerInnen können die gesendeten und gemessenen Zustände zusammen mit der gewählten Messbasis in eine außerhalb von phyphox geführte Tabelle eintragen und durch Vergleiche der Messbasen einen Schlüssel erstellen bzw. den Abhörversuch von Eve erkennen.

Wie in Abbildung 9 zu sehen ist, sind die gesendeten Polarisationszustände für Bob (und Eve) offen sichtbar. Dies ist insofern sinnvoll, als dass die SchülerInnen bei der Durchführung des Versuchs sehen, was während der Messvorgänge geschieht, und so das Konzept des BB84-Protokolls besser nachvollziehen können. Allerdings hat dies nichts mit der physikalischen Realität zu tun, in der die Sicherheit des BB84-Protokolls sich gerade aus der Tatsache ergibt, dass der gesendete Zustand eben nur Alice bekannt sein kann. Aus diesem Grund wurde ein weiteres Konfigurationsset von Alice, Bob und Eve in phyphox erstellt, in dem die gesendeten Zustände in einem separaten Reiter zur späteren Übertragung abgespeichert werden. Zudem wird in diesen Experimenten das Farbsignal über eine Folge von Pseudozufallszahlen verschlüsselt, sodass auch aus der angezeigten Farbe nicht mehr direkt auf den übermittelten Polarisationszustand geschlossen werden kann. Da für die Übertragung von Alice zu Bob/Eve bzw. von Eve zu Bob jeweils ein fester Seed für die Zahlenfolge verwendet wird, können Bob/Eve das Farb-

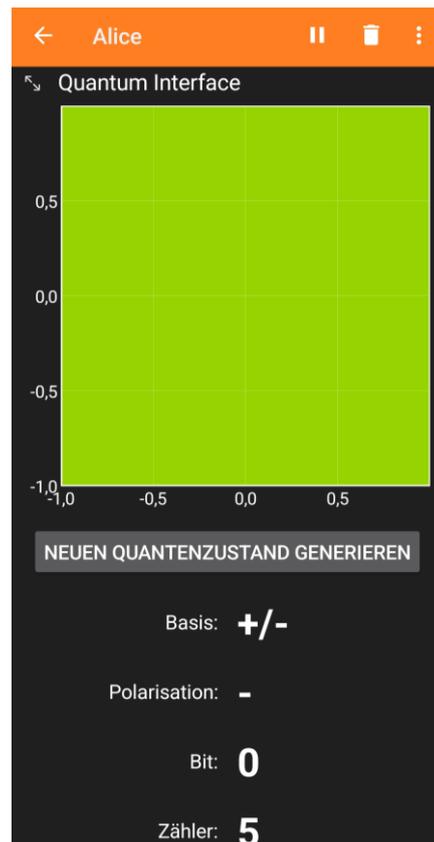


Abb. 8: Screenshot des Alice-Experiments in phyphox. Eigene Darstellung.



Abb. 9: Screenshot des Bob-Experiments in phyphox, während einer Messung. Eigene Darstellung.

signal aber wieder entschlüsseln, solange sich Sender und Empfänger auf der gleichen Zählerposition befinden.

Zu guter Letzt wurde ein phyphox-Experiment namens „Eve, u there?“ entwickelt. Dieses entspricht dem Alice-Experiment mit verdeckten Zuständen, allerdings kann heimlich Eve über einen separaten Reiter hinzugeschaltet werden. Die Aufgabe von Bob ist es nun herauszufinden, ob ein Abhörversuch stattgefunden hat oder nicht.

4. Evaluation der Usability

Die Usability der konzipierten Experimente sowie der zugehörigen Anleitungen wurde seit dem Wintersemester 2024/25 in unterschiedlichen Settings getestet. Hierfür wurde der nutzerbasierte Ansatz des Usability Testings gewählt. In diesem werden die Experimente von ProbandInnen getestet und direktes Feedback wird eingeholt. In allen Settings geschah dies sowohl durch Beobachtung während des Versuchs (Concurrent Probing) als auch nach dem Versuch (Retrospective Probing), z.B. in Form von Praktikumsberichten oder Feedbackrunden. Nach dem Einarbeiten des Feedbacks wird der Test mit einer weiteren Personengruppe wiederholt [16]. Insofern stellt das Usability Testing eine Form des Design-Based-Research-Ansatzes dar [17].

Mithilfe dieses Vorgehens können wichtige Parameter wie die für die Versuchsdurchführung benötigte Zeit, die Zufriedenheit, Fehlerquellen sowie notwendige Änderungen schnell ermittelt bzw. identifiziert werden [16]. Typische Schwierigkeiten wie z.B. die Rekrutierung von ProbandInnen und die damit üblicherweise verbundenen Kosten stellen dabei im Bildungskontext ein geringeres Problem dar, da die Experimente testweise in der Lehre eingesetzt werden können.

Im Wintersemester 2024/25 wurden die Versuche zunächst im Physikalischen Praktikum für Chemiestudierende mit insgesamt $N=38$ Studierenden evaluiert. Dabei wurden beide Experimente im Durchschnitt von den Studierenden positiv aufgenommen. Allerdings wurden in dieser Entwicklungsphase bei dem Versuch zur h -Bestimmung wiederholt zwei Punkte kritisiert: die mangelnde Stabilität der Bluetooth-Verbindung sowie der aufwändige Wechsel der zu diesem Zeitpunkt noch einzeln an die phyphox:h-Box anzuschließenden LED-Einsätze. Als Reaktion auf letzteren Punkt wurde die Abdunklungsbox zum derzeitigen Stand weiterentwickelt. Von den ProbandInnen wurde zusätzlich ein eingeschränkter Workflow bei der Versuchsdurchführung bemängelt, was teilweise durch Unklarheiten in den Anleitungen, teilweise durch Beschränkungen in den Bedienelementen von phyphox verursacht wurde. Ein weiterer, hiermit verbundener Kritikpunkt war die für die Versuche zu gering bemessene Versuchszeit, was insbesondere den Versuch zum BB84-Protokoll betraf.

Im Januar 2025 wurden beide Versuche im Rahmen der alljährlichen Schulphysikwoche der RWTH Aachen erstmals mit OberstufenschülerInnen getestet. Auch hier war die Resonanz der 19 ProbandInnen prinzipiell gut. Die neue Abdunklungsbox stieß auf Anklang, sodass dieses Problem in diesem Entwicklungsschritt ausgeräumt war. Die Stabilität der Bluetooth-Verbindung und der eingeschränkte Workflow wurden auch in dieser Testphase kritisiert. Der Hauptkritikpunkt zum BB84-Experiment war, dass zwar Schlüssel erstellt, aber keine Nachrichten verschlüsselt werden.

Im Nachgang der zweiten Testphase wurden weitere Entwicklungsschritte vollzogen. Im Ergebnis ist das Bluetooth-Problem zum jetzigen Zeitpunkt durch eine Anpassung der Datenrate und eine Umstrukturierung der Datenverarbeitung im zugehörigen phyphox-Experiment behoben. Das Workflow-Problem wurde durch Einbindung von seit April 2025 verfügbaren neuen phyphox-Bedienelementen wie z.B. Schieberegler (siehe auch Abbildung 5) sowie durch eine Überarbeitung der Anleitungen adressiert. Eine Lösung bezüglich der Nachrichtenverschlüsselung ist derzeit in Planung (siehe Abschnitt 6).

Seit Mai 2025 finden Lehrkräfteworkshops statt, in denen die Aufbauten ebenfalls unter anderem hinsichtlich ihrer Usability evaluiert werden. Hierbei werden auch die neuen Bedienelemente in den phyphox-Experimenten sowie die Bauanleitung für den DIY-Aufbau getestet. Ein erster Workshop hat neben einer Verbesserung des Workflows gezeigt, dass die Fertigung der DIY-Aufbauten auch für Lehrkräfte ohne Vorerfahrung im Löten und 3D-Druck in max. 90 min je Aufbau machbar ist.

5. Zwischenfazit

Basierend auf dem bisherigen Feedback ist es gelungen, zwei zuverlässig funktionierende Versuche mit für den Schuleinsatz hinreichend gutem Workflow zu erstellen. Für beide Experimente werden i.d.R. jeweils unter 90 Minuten benötigt. Bei der BB84-Analogie reicht diese Zeit je nach geplantem Umfang auch für eine theoretische Einführung.

Der DIY-Aufbau zur Ermittlung der Planck-Konstante lässt sich anhand erster Ergebnisse auch von Lehrkräften ohne jegliche Vorerfahrung im DIY-Bereich in höchstens 90 Minuten fertigen. Die Materialkosten liegen hierbei bei etwa 45 €.

Beide Experimente weisen allerdings auch konzeptionsbedingte Einschränkungen auf. Aufgrund der Maximalspannung von 3,1 V im Aufbau zum Planck'schen Wirkungsquantum ist das Messen der Schwellenspannung von LEDs mit einer Wellenlänge von unter 420 nm nicht mehr zielführend und unter 400 nm gar nicht möglich. Das Analogieexperiment zum BB84-Protokoll stößt bei einigen Smartphone-Modellen auf Schwierigkeiten, bei denen der Beschleunigungssensor nur nach Überschreiten einer bestimmten Schwelle neue Daten schickt oder die

Daten ab einer bestimmten Dezimalstelle abschneidet. Im ersten Fall muss zwischen zwei Aktionen das Smartphone leicht angetippt werden, im zweiten Fall ist das Smartphone für das Experiment nicht verwendbar. Eine Problematik, die beide Experimente betrifft, ist die Verortung der Halbleiterphysik (Grundlage für die h-Bestimmung) bzw. von Quantentechnologien (wie dem BB84-Protokoll) am Rande oder außerhalb des Kernlehrplans [10].

6. Ausblick

In den in Abschnitt 4 erwähnten Lehrkräfte-workshops wird die Usability weiterhin systematisch evaluiert. Des Weiteren werden gemeinsam mit den teilnehmenden Lehrkräften verschiedene Konzepte für die Fertigung der DIY-Aufbauten sowie den Einsatz beider Versuche in der Schule entwickelt. Diese Konzepte sollen letztendlich insbesondere Schulen mit geringen finanziellen und/oder zeitlichen Ressourcen sowie geringer Vorerfahrung und/oder Ausstattung im Maker-Bereich helfen, neue Aufbauten in Form von kostengünstigen DIY-Projekten in die Physiksammlung zu bringen.

In den kommenden Monaten werden zudem zusätzliche Experimente entwickelt, die auf den vorgestellten DIY-Aufbau zurückgreifen. Dies adressiert auch den von einigen Lehrkräften vorgebrachten Kritikpunkt, dass der Fertigungsaufwand vergleichsweise hoch ist, wenn die Aufbauten nur für ein Experiment genutzt werden können.

Um den Hauptkritikpunkt der SchülerInnen bezüglich des BB84-Protokolls zu adressieren (Schlüssel-erstellung, aber keine Verschlüsselung), wird aktuell eine Web-Erweiterung der zugehörigen phyphox-Experimente geschaffen, in der kurze Worte mit dem wie bisher erstellten Schlüssel verschlüsselt werden können.

7. Literatur

- [1] Dorsel, Dominik: Entwicklung der Nutzbarkeit externer Sensoren bei Smartphone-Experimenten und deren Einsatz in naturwissenschaftlichen Experimenten, Dissertation, RWTH Aachen University (2023), S. 7-8. Verfügbar unter: <https://www.institut-1a.physik.rwth-aachen.de/go/id/huji/lidx/1/file/964136>
- [2] Staacks, Sebastian; Hütz, Simon; Heinke, Heidrun; Stampfer, Christoph: Advanced tools for smartphone-based experiments: phyphox. In: Physics Education 53 (2018), Nr. 4. Verfügbar unter: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6552/aac05e>
- [3] Staacks, Sebastian; Heinke, Heidrun; Stampfer, Christoph: Smarte Experimente. In: Physik Journal 17 (2018), Nr. 11.
- [4] Phyphox: Experimente (Stand 05/2025). URL: <https://phyphox.org/de/experimente/>.
- [5] Medienpädagogischer Forschungsverbund Südwest: JIM-Studie 2024: Jugend, Information, Medien (2024). Verfügbar unter: <https://mpfs.de/studie/jim-studie-2024/>
- [6] Phyphox: Bluetooth Low Energy (Stand 05/2025). URL: <https://phyphox.org/de/ble-de/>.
- [7] Dorsel, Dominik; Staacks, Sebastian; Heinke, Heidrun; Stampfer, Christoph; Kuhn, Jochen; Wilhelm, Thomas: Visualisierung von Messdaten eigener Sensormodule mit phyphox. In: Physik unserer Zeit 53 (2023), Nr. 3, S. 151--152.
- [8] Herbst, Markus; Fürtbauer, Eva-Maria; Strahl, Alexander: Interesse an Physik. DPG-Frühjahrstagung, Hannover (2016).
- [9] Breuer, Judith; Vogelsang, Christoph; Reinhold, Peter: Nutzungsverhalten von Lehrkräften bei der Implementierung einer physikdidaktisch innovativen Unterrichtskonzeption. In: Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften 29 (2022), Nr. 1, S. 1-13.
- [10] Ministerium für Schule und Bildung des Landes Nordrhein-Westfalen: Kernlehrplan für die Sekundarstufe II Gymnasium / Gesamtschule in Nordrhein-Westfalen (2022).
- [11] Avago Technologies: HLMP-CExx Data Sheet (Stand 05/2025). Verfügbar unter: https://www.mouser.de/datasheet/2/678/avago_HLMP-CExx-1217257.pdf.
- [12] Pili, Unofre; Violanda, Renante: Smartphone-based measurement of the Planck's constant with light-emitting diodes. In: Physics Education 53 (2019), Nr. 4.
- [13] Qualitäts- und UnterstützungsAgentur – Landesinstitut für Schule: 3-D-Druck in der Schule: Informationen und Orientierung für den Einstieg in den Unterricht (Stand 05/2025). Verfügbar unter: <https://www.schulentwicklung.nrw.de/cms/faecher/faecheruebergreifend/3d-druck-in-der-schule.html>.
- [14] Reddy, Sujaykumar; Mandal, Sayan; Mohan, Chandra: Comprehensive Study of BB84, A Quantum Key Distribution Protocol. In: International Research Journal of Engineering and Technology 3 (2023), Nr. 10, S. 1023-1034.
- [15] Westfälische Wilhelms-Universität Münster: O3Q. BB84-Protokoll (Stand 05/2025). URL: <https://o3q.de/bb84/>.
- [16] Kaminski, June: Theory applied to informatics – Usability. In: Canadian Journal of Nursing Informatics 15 (2020), Nr. 4.
- [17] Schmiedebach, Mario; Wegner, Claas: Designed-Based Research als Ansatz zur Lösung praxisrelevanter Probleme in der fachdidaktischen Forschung. In: Bildungsforschung 2 (2021), S. 1-10.

Entwicklung von Lernzirkelstationen zur Variablenkontrollstrategie mit geringem Materialaufwand

Stephanie Gehnen, Tobias Winkens, Heidrun Heinke

I. Physikalisches Institut IA, RWTH Aachen University
Sommerfeldstraße 14, 52074 Aachen
stephanie.gehnen@rwth-aachen.de

Kurzfassung

Eine zentrale Fähigkeit beim Experimentieren ist die Variablenkontrollstrategie (VKS), die die vier Teilfähigkeiten zur Interpretation, Identifikation und Planung kontrollierter Experimente sowie das Verständnis über die fehlende Aussagekraft konfundierter Experimente umfasst. Auf Basis der Plattform FLexKom (vgl. Goertz, 2022) wurden Lernzirkelstationen mit einem geringen Materialaufwand entwickelt, welche Haushaltsgegenstände als Experimentiermaterialien nutzen. So soll ein einfacherer Zugang zu Experimenten zur Förderung der VKS geschaffen werden. Es wurden drei Stationen für Schüler*innen der Mittelstufe konzipiert, die verschiedene Gebiete der Mechanik behandeln. Eine Station untersucht die Flugweite von Papierfliegern anhand des Abwurfwinkels und der Papierstärke. In der zweiten Station wird die Aufprallhöhe eines Tennisballs nach dem ersten Aufprall unter Berücksichtigung des Innendrucks sowie der Fallhöhe des Balls erkundet. Diese Station lässt sich in zwei Varianten (analoge Zeitmessung und vereinfachte Videoanalyse) durchführen. Als dritte Station wird die Falldauer von selbstgebauten Fallschirmen in Abhängigkeit des Materials und der Größe des Fallschirms betrachtet. Für jede Station sind vier verschiedene Arbeitsblätter zur Förderung von je einer der vier VKS-Teilfähigkeiten entwickelt worden. In diesem Beitrag wird ein Einblick in die Lernzirkelstationen gegeben und eine erste Erprobung der Handhabung der Experimente im Zuge eines Ferienprogramms mit N=19 Schüler*innen vorgestellt.

1. Motivation

Ein zentrales Ziel des Physikunterrichts ist das Erwerben der Kompetenz, Experimente selbstständig zu planen, durchzuführen und auszuwerten. Bei der Planung und Durchführung von Experimenten findet die Variablenkontrollstrategie (VKS) Anwendung, mit der systematisch der Einfluss einzelner Variablen auf die gesuchte Größe bestimmt werden kann. Bei der VKS wird bei verschiedenen Variablen eines Experiments gezielt eine einzelne Variable verändert, während alle anderen Variablen konstant bleiben (vgl. Chen & Klahr, 1999, S. 1098). Um verschiedene experimentelle Kompetenzen zu fördern, sind im Rahmen der Plattform FLexKom¹ (Fördern und Lernen experimenteller Kompetenzen) am I. Physikalisches Institut der RWTH Aachen University verschiedene Lernzirkelstationen zu diversen physikalischen Themengebieten entwickelt worden. Auch zur VKS gibt es Lernzirkelstationen, die allerdings Materialien benötigen, über welche nicht zwingend jede Schule im ausreichenden Umfang verfügt. Dies stellt eine deutliche Hürde für die Implementation der Lehr-Lern-Materialien in der Schulpraxis dar.

Eine Möglichkeit zur Verbesserung der Förderung der VKS ist es, neue Lernzirkelstationen zu konzipieren, die mit einem geringeren Materialaufwand auskommen. Dazu sollen Materialnutzungskriterien von Lehrkräften beachtet werden. Zudem sollen die neuen Lernzirkelstationen sowohl fachlich als auch methodisch für Schüler*innen der Mittelstufe geeignet sein, um einen flexiblen Einsatz im Rahmen eines Lernzirkels nach dem FLexKom-Konzept zu ermöglichen. Die VKS unterteilt sich in die vier Teilfähigkeiten Identifikation und Planung kontrollierter Experimente, die Interpretation der Ergebnisse solcher Experimente sowie das Erlangen von Verständnis über die fehlende Aussagekraft konfundierter Experimente (vgl. Schwichow, 2015, S. 53). Alle vier Teilfähigkeiten können und sollen mithilfe von verschiedenen Arbeitsblättern differenziert gefördert werden (vgl. Winkens et al., 2024).

In dem vorliegenden Beitrag werden nach einer kurzen theoretischen Einführung drei Lernzirkelstationen zur Förderung der VKS im Themengebiet der

¹ Abrufbar unter: <https://sciphylab.de/flexkom/> (Stand 27.04.2025)

Mechanik vorgestellt. Anschließend folgt eine Beschreibung einer ersten Erprobung in einem regionalen Ferienprogramm.

2. Theoretischer Hintergrund

2.1. Variablenkontrollstrategie

Die VKS ist eine Teilkompetenz beim Experimentieren. Bei einem kontrollierten Experiment unterscheiden sich die einzelnen Telexperimente nur in der Ausprägung einer einzelnen Variablen, während alle anderen Variablen konstant gehalten werden (vgl. Chen & Klahr, 1999, S. 1098). Dies muss bei der Planung von Experimenten berücksichtigt werden. Auch das Differenzieren zwischen konfundierten und kontrollierten Experimenten ist ein fundamentaler Teil der VKS (vgl. Chen & Klahr, 1999, S. 1098). „Das Kontrollieren potenziell konfundierter Variablen [...] gewährleistet eine eindeutige Identifizierung kausaler Zusammenhänge und begründet die höhere Aussagekraft [...] von Experimenten im Vergleich zu reinen Beobachtungen“ (Schwichow, 2015, S. 3), weswegen das Erlernen der VKS relevant für die Entwicklung von wissenschaftlichen Argumentationsfähigkeiten im Sinne einer naturwissenschaftlichen Grundbildung ist (vgl. Chen & Klahr, 1999, S. 1098).

Die VKS lässt sich in die vier Teilfähigkeiten Identifikation von kontrollierten Experimenten aus einer Auswahl von kontrollierten und konfundierten Experimenten (ID), Interpretation der Ergebnisse kontrollierter Experimente (IN), Planung von kontrollierten Experimenten (PL) und Verständnis über die Unbestimmtheit von konfundierten Experimenten (UN) aufteilen (vgl. Schwichow, 2015, S. 53). Testitems zu den verschiedenen Teilfähigkeiten haben je nach Teilfähigkeit eine unterschiedliche Lösungswahrscheinlichkeit.



Abb. 1: Übersicht über die einzelnen Teilfähigkeiten zur VKS mitsamt ihren Abkürzungen. Die Farben weisen auf das Schwierigkeitsniveau hin. Die grünen Items werden als vergleichsweise einfach angesehen und das rote Item als vergleichsweise schwierig. Eigene Darstellung in Anlehnung an Schwichow, 2015, S. 53 und Winkens und Heinke, 2023, S. 180.

In einer Zusammenstellung verschiedener Studien kommen Winkens und Heinke (2023) zu dem Ergebnis, dass Items zu den Teilfähigkeiten ID und IN die höchste Lösungswahrscheinlichkeit besitzen, danach folgen die Items zu der Teilfähigkeit PL und die geringste Lösungswahrscheinlichkeit liegt bei den Items zur Teilfähigkeit UN (vgl. Winkens & Heinke, 2023, S. 180). Dies ist in Abbildung 1 visualisiert.

2.2. Die Plattform FLexKom

Zur Unterstützung der Förderung experimenteller Kompetenzen gemäß der nationalen Bildungsstandards (vgl. KMK, 2024, S. 8) kann die Plattform FLexKom verwendet werden. Diese bietet „diverse Module zu experimentellen Kompetenzen“ (Goertz, 2022, S. 101) an, welche eigenständig von den Schüler*innen bearbeitet werden können. Die Module lassen sich flexibel zu Lernzirkeln zusammenstellen, wobei eine Bearbeitungszeit pro Lernzirkelstation von 8 oder 15 Minuten vorgesehen ist (vgl. Goertz, 2022, S. 110). Die entsprechende Website bietet den Lehrkräften zur Gestaltung der individuellen Lernzirkel verschiedene Filtermöglichkeiten zu den Kompetenzen und Themen sowie Materialien und Vorlagen zum Download an.

Speziell zur Förderung der VKS gibt es auf der Website aktuell sechs Module. Die Module sind dabei den Inhaltsfeldern Mechanik, Magnetismus und Elektrizitätslehre zugeordnet. Dabei gibt es in jedem Modul neben einer abhängigen Variable auch zwei bis drei unabhängige Variablen. Bei allen sechs Modulen werden typische Sammlungsmaterialien wie Stativstangen, eine schiefe Ebene oder auch Kabel und Drähte verwendet. Bei einzelnen Stationen wird ein 3D-Drucker in der Vorbereitung benötigt.

Eine weitere Unterstützung zur Förderung der VKS bieten teilfähigkeitsspezifische Arbeitsblattvorlagen (vgl. Winkens et al., 2024, S. 362). Diese sollen künftig ebenfalls über die Plattform FLexKom abgerufen werden können. Die vier Arbeitsblattvorlagen bieten die Chance, ein Experiment zur VKS direkt differenziert nach den Teilfähigkeiten zu gestalten und beim Einsatz das Vorwissen der Schüler*innen zu berücksichtigen. Dazu gibt es in den Arbeitsblättern Platzhalter, die individuell von Lehrkräften an diverse Experimente zur VKS angepasst werden können. Die Vorlagen sind universell für Experimente aus verschiedenen Inhaltsfeldern einsetzbar, sofern als einzige Bedingung drei verschiedene, unabhängige Variablen auftreten (vgl. Winkens et al., 2024, S. 363). Bei dem Einsatz der Vorlagen im Unterricht wird ein aktives Experimentieren der Schüler*innen gefordert, wodurch experimentelle Kompetenzen gezielt gestärkt werden (vgl. Winkens & Heinke, 2024, S. 133f.).

2.3. Materialreduktion und Materialnutzung

Unter der Materialreduktion wird in diesem Beitrag zum einen verstanden, dass im Sinne einer didakti-

schen Reduktion nur die wesentlichen Experimentiermaterialien verwendet werden und es keine zu abstrakten und komplexen Informationen und Gegenstände gibt (vgl. Steller et al., 2019, S. 11f.). Ergänzend wird die Reduktion im umgangssprachlichen Sinne als qualitative Verminderung betrachtet (vgl. Steller et al., 2019, S. 12). Diese Bedeutung findet sich in den entwickelten Experimenten darin wieder, dass die Kosten der Materialien gering sein sollen und der zeitliche und logistische Aufwand für die Vorbereitung und Erstellung der Experimentiermaterialien ebenfalls minimiert werden soll.

Neben der Reduktion der Materialien sollen auch Materialnutzungskriterien von Lehrkräften berücksichtigt werden. Nach Breuer lassen sich diese in formale Kriterien und inhaltliche Kriterien unterscheiden (vgl. Breuer, 2021, S. 155). In Tabelle 1 ist eine Übersicht der Kriterien zu finden, die bei der Entwicklung der Lernzirkelstationen dieses Beitrags berücksichtigt wurden.

Tab. 1: Für die Lernzirkelstationen ausgewählte Materialnutzungskriterien von Lehrkräften nach Breuer, 2021, S. 155-161.

Formale Kriterien	Inhaltliche Kriterien
Passung zur Schulausstattung	Alltagsbezug
Niedriger Preis	Lehrplanpassung
Hohe Verfügbarkeit	Differenzierung
Arbeiterleichterung	Breites Aufgabenangebot
Editierbarkeit	Angemessenes Anforderungsniveau

3. Beschreibung der entwickelten Lernzirkelstationen

Die drei folgenden Lernzirkelstationen sind thematisch der Mechanik zuzuordnen und richten sich inhaltlich am Physikunterricht der Mittelstufe an Gymnasien in NRW aus (vgl. MSW, 2019, S. 32). Konkret lassen sich die Stationen dem Inhaltsfeld Bewegung, Kraft und Energie des Kernlehrplans NRW zuordnen (vgl. MSW, 2019, S. 17). Zu jeder Lernzirkelstation gibt es zu allen vier Teilfähigkeiten der VKS teilfähigkeitsspezifische Arbeitsblätter, die aus den in Abschnitt 2.2. genannten Arbeitsblattvorlagen entstanden sind.

3.1. Flugweite eines Papierfliegers

Bei dieser Lernzirkelstation sollen die Schüler*innen die Flugweite von Papierfliegern untersuchen. Aus dem Alltag wissen vermutlich die meisten Schüler*innen bereits, dass nicht jeder Papierflieger gleich weit fliegt. In dieser Station sollen verschiedene Einflussfaktoren systematisch untersucht werden. Bei einem gleichen Papierfliegermodell wird einerseits die Blattstärke modifiziert, und andererseits wird der Abwurfwinkel variiert. Um reproduzierbare Ergebnisse

zu erhalten, wird eine Papierfliegerabwurfmaschine verwendet, sodass die Schubkraft, die der Papierflieger beim Abwurf erhält, weitestgehend konstant bleibt. Es bietet sich eine feste Abwurframpe an, um den Winkel (ebenso wie die Starthöhe) konstant zu halten. Die abhängige Variable ist die Flugweite des Papierfliegers, und die beiden unabhängigen Variablen sind die Papierstärke und der Abwurfwinkel. Es muss ein windstiller Ort mit einer ausreichend großen Experimentierfläche gewählt werden, wozu sich beispielsweise ein Schulflur anbietet. Zudem ist ein Maßband erforderlich. Eine Skizze des Versuchsaufbaus ist in Abbildung 2 zu sehen.

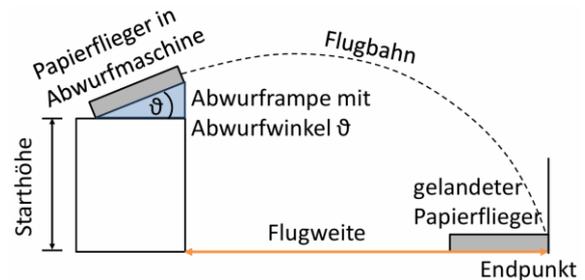


Abb. 2: Versuchsaufbau zur Lernzirkelstation zur Flugweite eines Papierfliegers. Eigene Darstellung.

Für die Durchführung werden zwei Papierflieger der gleichen Bauart benötigt. Die beiden Papierflieger unterscheiden sich in der Papierstärke (im Beispiel 80 g/m^2 vs. 160 g/m^2), sodass bei einem gleichen Abwurfwinkel der Einfluss der Papierstärke herausgefunden werden kann. Wenn nur einer der Papierflieger verwendet wird, kann der Einfluss des Abwurfwinkels untersucht werden.

Eine erste Versuchsreihe von zehn Durchgängen je Konfiguration zeigt unterschiedliche Flugweiten für die verschiedenen experimentellen Parameter. Die Bestwerte der einzelnen Konfigurationen sind mitsamt der Gesamtunsicherheit bestehend aus der Standardunsicherheit und einer Ablesunsicherheit in Tabelle 2 dargestellt.

Tab. 2: Bestwerte mitsamt der Gesamtunsicherheit für die verschiedenen Konfigurationen bei der Lernzirkelstation zum Papierflieger ($N=10$).

	$\theta = 30 \text{ Grad}$	$\theta = 50 \text{ Grad}$
Dünnes Papier	$(260 \pm 7) \text{ cm}$	$(26 \pm 5) \text{ cm}$
Dickes Papier	$(195 \pm 5) \text{ cm}$	$(12 \pm 4) \text{ cm}$

Die gemessenen Werte sind dabei vom Modell des Papierfliegers, der genauen Stärke des Papiers sowie der Schubkraft beim Abflug abhängig. Die Tabelle zeigt aber, dass Kombinationen von experimentellen Parametern gefunden werden können, die zu deutlichen Unterschieden in der abhängigen Variable führen.

3.2. Aufprallhöhe eines Tennisballs

In der Lernzirkelstation zur Untersuchung der Aufprallhöhe eines Tennisballs werden Tennisbälle mit

unterschiedlichem Innendruck verwendet, die bei verschiedenen Fallhöhen losgelassen werden. Die Tennisbälle mit verschiedenem Innendruck lassen sich beispielsweise in einem Sportgeschäft kaufen. Für diese Station werden zusätzlich zu regulären Tennisbällen druckreduzierte Tennisbälle verwendet. Bei der Lernzirkelstation soll die Aufprallhöhe untersucht werden. Das ist die Höhe, die ein Tennisball nach dem ersten Aufprall auf dem Boden im Scheitelpunkt seiner Bahn wieder erreicht. Die Aufprallhöhe ist dabei die abhängige Variable und der Innendruck sowie die Fallhöhe sind die unabhängigen Variablen. Als Zusatzaufgabe kann die Bodenart geändert werden, indem entweder ein anderer Boden verwendet wird oder Papier (mit variabler Anzahl der Lagen Papier) auf den gleichbleibenden Boden gelegt wird. Physikalisch ist als Konzept bei dieser Lernzirkelstation die Energieerhaltung interessant. In Abbildung 3 ist eine Skizze des Versuchs zu sehen.

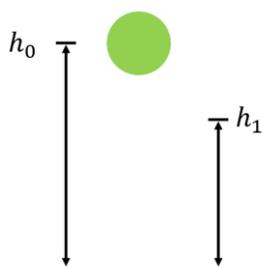


Abb. 3: Darstellung des Versuchs zur Aufprallhöhe eines Tennisballs. h_0 ist die Ausgangshöhe beim Fall, h_1 die maximal erreichte Höhe nach dem ersten Aufprall. Eigene Darstellung.

In der ersten Stationsvariante wird die Zeit zwischen dem ersten und dem zweiten Aufprall mithilfe der akustischen Stoppuhr (vgl. Staacks et al., 2017) in der App phyphox (vgl. Staacks et al., 2018) gemessen. Aus der gemessenen Zeit t kann mithilfe von

$$h_1 = \frac{1}{8}gt^2 \quad \{1\}$$

die Aufprallhöhe h_1 abgeschätzt werden. Um diese Variante umzusetzen, werden ein regulärer und ein druckreduzierter Tennisball, ein Maßband zur Ermittlung der Starthöhe sowie ein Endgerät mit der App phyphox benötigt. Mit den Messwerten bei zehn

Durchführungen lassen sich die vermuteten Abhängigkeiten und Unterschiede bestätigen, wie in Tabelle 3 zu erkennen ist. Die Messwerte wurden auf einem Linoleum-Boden aufgenommen. Abhängig von der Bodenart können die Werte stark von den hier angegebenen Werten abweichen.

In der zweiten Variante wird mithilfe eines videofähigen Endgeräts eine Videoaufnahme des Vorgangs angefertigt. Dazu werden die Tennisbälle direkt neben einem Maßstab fallengelassen. Das Video wird danach in Zeitlupe abgespielt, um die Aufprallhöhe abzulesen. Dabei müssen Parallaxeffekte beim Ablesen durch geeignete Aufnahmebedingungen möglichst minimiert werden. Die Messwerte dieser Variante sind ebenfalls in Tabelle 3 aufgeführt. Die Messwerte wurden auf dem gleichen Linoleum-Boden wie bei der ersten Station aufgenommen.

Tabelle 3 erlaubt auch einen Vergleich der mit beiden Messverfahren erhobenen Daten und zeigt dabei zum Teil signifikante systematische Abweichungen. Werden in einer Lerngruppe beide Messverfahren eingesetzt, dann kann dies auch genutzt werden, um mit Schüler*innen Vor- und Nachteile beider Verfahren kritisch zu diskutieren. In jedem Fall wird dadurch klar, dass neben den Variablen der Starthöhe und der Merkmale der Bälle auch das Messverfahren selbst im Sinne der VKS möglichst konstant gehalten werden muss.

Trotz der beobachteten Unterschiede zwischen den Messwerten für die gleichen Konfigurationen, aber verschiedenen Messverfahren, lassen sich zwischen den verschiedenen gezeigten Variablenausprägungen Unterschiede erkennen. Auch dieses Experiment ist demnach zur Förderung der VKS im Schulunterricht geeignet.

3.3. Falldauer eines Fallschirms

Bei der dritten Lernzirkelstation werden kleine Fallschirme aus Küchenpapier und dünnen Plastiktüten in zwei verschiedenen Größen durch die Schüler*innen selbst gebastelt. Dazu wird eine rechteckige Fläche ausgeschnitten. An dieser werden an allen vier Ecken Fäden befestigt und diese Fäden zusammengeknotet. An die zusammengeknoteten Fäden werden Büroklammern als kleine Massestücke gehängt. Die Anzahl der Büroklammern muss bei allen Fallschirmen

Tab. 3: Messwerte für die verschiedenen Konfigurationen bei der Lernzirkelstation zur Aufprallhöhe eines Tennisballs – einmal in der Variante der Zeitmessung mithilfe von phyphox und einmal in der Variante der Videoanalyse (je N=10).

	Zeitmessung		Videoanalyse	
	$h_0 = 0,50 \text{ m}$	$h_0 = 1,50 \text{ m}$	$h_0 = 0,50 \text{ m}$	$h_0 = 1,50 \text{ m}$
Regulärer Tennisball	$(0,34 \pm 0,02) \text{ m}$	$(0,93 \pm 0,03) \text{ m}$	$(0,48 \pm 0,02) \text{ m}$	$(0,97 \pm 0,03) \text{ m}$
Druckreduzierter Tennisball	$(0,30 \pm 0,02) \text{ m}$	$(0,78 \pm 0,02) \text{ m}$	$(0,34 \pm 0,02) \text{ m}$	$(0,83 \pm 0,02) \text{ m}$

gleich gewählt werden, damit die Ergebnisse vergleichbar sind. Die Fallschirme werden aus einer festen Höhe fallengelassen und die Dauer des Falls wird gemessen. Physikalisch sind bei dieser Station das Konzept des Kräftegleichgewichts und der Auftrieb relevant. Die unabhängigen Variablen sind die Größe des Fallschirms sowie das Material. Weitere unabhängige Variablen der Starthöhe und Zusatzmasse werden nicht verändert. Die abhängige Variable ist die Falldauer. Bei der Durchführung in der Schule sollte erwähnt werden, dass mehrere Materialeigenschaften einen Einfluss auf die Falldauer haben, sodass aus dem Experiment nur Aussagen allgemein zum Material und nicht zu spezifischen Materialeigenschaften getroffen werden können. Als Erweiterung kann zudem überprüft werden, ob die Fallgeschwindigkeit konstant ist, um ein Kräftegleichgewicht nachzuweisen. Dazu können die Falldauern aus verschiedenen Fallhöhen verglichen werden.

In Tabelle 4 befinden sich Bestwerte aus einer Messung mit zehn Durchgängen mitsamt einer Gesamtunsicherheit (bestehend aus der Standardunsicherheit, der Reaktionszeit des Menschen sowie der systematischen Unsicherheit). Dort sind auch die Abmessungen und Flächen der verwendeten Fallschirme aufgeführt. Die Fallschirme wurden aus einer Höhe von 1,50 m fallengelassen.

Tab. 4: Messwerte für die verschiedenen Konfigurationen bei der Station zur Falldauer eines Fallschirms (N=10).

	Kleiner Fallschirm	Großer Fallschirm
	16 cm x 17,5 cm (A = 280 cm ²)	23 cm x 26 cm (A = 598 cm ²)
Küchenpapier	(1,39 ± 0,16) s	(2,03 ± 0,16) s
Plastiktüte	(1,83 ± 0,16) s	(2,42 ± 0,17) s

Auch bei dieser Lernzirkelstation sind Unterschiede zwischen den einzelnen Konfigurationen der Variablen im Sinne der VKS zu erkennen.

4. Erprobung der Experimente der Lernzirkelstationen

Die zuvor vorgestellten Lernzirkelstationen zur Förderung der VKS mit einem geringen Materialaufwand wurden im Rahmen eines regionalen Ferienangebots mit Schüler*innen erprobt. Dieses Ferienangebot hat zwei Wochen lang in den Sommerferien stattgefunden und Schüler*innen verschiedener Jahrgangsstufen an jedem der Tage verschiedene Angebote der Schülerlabore der RWTH Aachen University unterbreitet. An dem Tag der Erprobung der Experimente aus den Lernzirkelstationen haben 22 Schü-

ler*innen im Alter von 7 bis 11 Jahren an dem Ferienangebot teilgenommen. Davon haben 19 Schüler*innen mindestens eins der Experimente getestet.

4.1. Durchführung der Erprobung

Aufgrund des Alters der Schüler*innen wurden die Experimente größtenteils mit einer mündlichen Anleitung und ohne Berücksichtigung der Arbeitsblätter durchgeführt, da diese für Schüler*innen im Alter von 13 bis 15 Jahre ausgelegt sind. Die prinzipielle Funktionsfähigkeit der Arbeitsblattvorlagen ist bereits in anderen Kontexten getestet worden, sodass das Testen der Experimente eine höhere Relevanz hatte. Bei dem Experiment zur Aufprallhöhe eines Tennisballs wurde nur die Variante der Zeitmessung mit den Schüler*innen getestet.

Da während der Erprobung der Experimente die Arbeitsblätter für die beiden einfacheren Teilfähigkeiten ID und IN auf den Tischen zur Verfügung bereitlagen, haben einige wenige Schüler*innen - mit der Unterstützung der Aufsichtspersonen - auch diese Arbeitsblätter bearbeitet. Dies war jedoch nicht der Schwerpunkt der Erprobung. Die Arbeitsblätter für die Teilfähigkeiten PL und UN wurden den relativ jungen Schüler*innen nicht zur Verfügung gestellt.

Im Anschluss an die jeweiligen Experimente wurden die Schüler*innen gebeten, auf freiwilliger Basis einen kurzen Feedbackbogen auszufüllen, der sowohl personenbezogene Items (3)² als auch Items zum Spaß beim Experimentieren (2), Feedback zu den konkreten Experimenten (5), eine Frage zu möglichen Stationsnamen (1) sowie ein Item zu sonstigem Feedback beinhaltet hat. Es haben nicht alle der Schüler*innen diesen Feedbackbogen ausgefüllt. In Tabelle 5 ist eine Übersicht der teilnehmenden Schüler*innen an den Experimenten zu sehen. Dabei wird die Anzahl der Teilnehmer*innen pro Experiment, die Anzahl der ausgefüllten Feedbackbögen sowie die Anzahl der bearbeiteten Arbeitsblätter angegeben.

Tab. 5: Übersicht über die Zahl der Teilnehmer*innen an der Erprobung der Experimente, die Anzahl der ausgefüllten Feedbackbögen sowie die Anzahl der bearbeiteten Arbeitsblätter für die drei Experimente.

Experiment	Teilnehmende	Feedbackbögen	Arbeitsblätter
Papierflieger	12	6	0
Tennisball	4	3	3
Fallschirm	6	4	1

Auf den Arbeitstischen für die Schüler*innen lagen die benötigten Materialien für die Stationen sowie

² Die Zahl in der Klammer bezeichnet die Anzahl der Items zu der jeweiligen Kategorie.

Bastelanleitungen für die Stationen zur Flugweite des Papierfliegers und zur Falldauer des Fallschirms. Die Arbeitsblätter und die Feedbackbögen lagen ebenfalls auf den Arbeitstischen. Die Schüler*innen sollten selbstständig die Papierflieger, eine Papierfliegerabwurfmaschine sowie die Fallschirme bauen. Dies kann im Schuleinsatz ähnlich gehandhabt oder auch vorab vorbereitet werden.

4.2. Beobachtungen der Erprobung

Die Schüler*innen hatten viel Spaß daran, die Papierflieger durch den Raum fliegen zu lassen. Die Mehrheit der Schüler*innen führte das Experiment allerdings ohne mechanische Hilfsmittel wie eine Abwurfmaschine durch. Nur vier der Schüler*innen haben eine solche Abwurfmaschine verwendet, was zu reproduzierbareren Bedingungen führte und ein sinnvolles Erlernen der VKS erst ermöglicht. Die Variation der Papierdicke zeigte bei den Schüler*innen erwartungsgemäß Effekte auf die Flugweite (siehe Tabelle 2). Kein*e Schüler*in hat von der Möglichkeit Gebrauch gemacht, den Abwurfwinkel zu verändern. Die relativ jungen Schüler*innen hatten Probleme bei der korrekten Anwendung der VKS. Auch die Frage, ob man zeitgleich zwei Variablen verändern kann, um ein zuverlässiges Ergebnis zu bekommen, konnten die Schüler*innen nicht auf Anhieb korrekt beantworten. Dies verdeutlicht nochmal den Bedarf, die VKS als wichtige experimentelle Kompetenz im naturwissenschaftlichen Unterricht zu schulen.

Viele der Schüler*innen haben unter den Rahmenbedingungen des Ferienangebots kein Interesse daran gezeigt, eine Abwurfmaschine zu bauen oder zu verwenden. Die Schüler*innen, die diese jedoch verwendet haben, haben diese als positiv wahrgenommen. Das Falten der Papierflieger (sowohl nach der Anleitung als auch von eigenen Modellen) hat bei den älteren Schüler*innen, die näher am Alter der Zielgruppe der entwickelten Experimente waren, problemlos funktioniert. Bei jüngeren Schüler*innen zeigten sich leichte motorische Schwierigkeiten. Sollten die Experimente auch für jüngere Schüler*innen zum Einsatz kommen, muss im Schulunterricht genügend Zeit eingeplant werden, um sowohl die Papierflieger zu falten als auch eine Abwurfmaschine zu bauen. Das Falten kann auch im Vorhinein in der Vorbereitung durch die Lehrkraft geschehen.

Das Experiment zur Aufprallhöhe eines Tennisballs wurde von den Schüler*innen ohne größere Probleme erfolgreich bearbeitet. Dort gab es kaum Rückfragen der Schüler*innen und die bearbeiteten Arbeitsblätter waren korrekt ausgefüllt. Bevor die Schüler*innen selbstständig experimentieren konnten, mussten zunächst die Einstellungen der akustischen Stoppuhr in phyphox auf den Boden und die Lautstärke des Aufpralls angepasst werden. Dies sollte auch vor der Verwendung des Experiments im Schulunterricht durch die Lehrkraft getestet werden.

Beim dritten Experiment hat es den Schüler*innen gefallen, den Sinkvorgang der Fallschirme zu betrachten. Anders als es vorgesehen war, haben sie allerdings nicht die Zeit gemessen, sondern zwei Fallschirme, die sich in der Ausprägung einer Variablen unterschieden haben, gleichzeitig fallen gelassen. Die intendierten physikalischen Zusammenhänge wurden von den Schüler*innen auf diese Weise qualitativ erkannt. Die Schüler*innen waren jedoch im Allgemeinen nicht ausreichend motiviert, alle vier Fallschirme selbst zu bauen und haben stattdessen meistens einen Fallschirm gebaut und für die anderen Konfigurationen vorgefertigte Fallschirme verwendet. Dieses Problem könnte sich im Unterricht durch die beim Experimentieren übliche Arbeit in Gruppen erübrigen. Das Knoten der Fäden beim Basteln eigener Fallschirme war für einige jüngere Schüler*innen motorisch eine Herausforderung, sodass gegebenenfalls in einigen Lerngruppen für den Schulunterricht entweder über alternative Befestigungsmöglichkeiten nachgedacht werden sollte oder die Lehrkraft die Fallschirme im Vorhinein selbst bauen sollte. Das Basteln eines Fallschirms hat ungefähr 10 min bei den Schüler*innen in Anspruch genommen, sodass dieses selbst nicht im Rahmen der Lernzirkelstation umsetzbar ist.

Insgesamt sind die Beobachtungen zu den einzelnen Stationen positiv und die Experimente haben größtenteils gut funktioniert. Für die Schulumsetzung sollte das Basteln der einzelnen Bestandteile für zwei der Experimente aus der Durchführung der Lernzirkel ausgelagert werden. Hier bieten sich verschiedene Lösungen an, wie die Bereitstellung des fertigen Materials durch die Lehrkraft oder auch die gemeinsame Erstellung der Materialien durch die Schüler*innen vor dem Einsatz des Lernzirkels.

4.3. Ergebnisse der Feedbackbögen

Bei den personenbezogenen Items wurde nach dem Alter, der Schulform und der Jahrgangsstufe nach den Sommerferien gefragt. Dabei waren die Schüler*innen zwischen 7 und 11 Jahre alt (N=19, Durchschnittsalter von 9,75 Jahren). Die Schüler*innen besuchten überwiegend ein Gymnasium, zwei Schüler*innen eine Grundschule und eine Person eine Gesamtschule. Die meisten Schüler*innen sind nach den Sommerferien in die 5. Klasse gekommen.

Die Schüler*innen hatten viel Spaß bei den Experimenten und würden die Experimente auch gerne in der Schule durchführen, wie die Ergebnisse der beiden Items zum Spaß beim Experimentieren in Abbildung 4 belegen.

Bei den experimentspezifischen Fragen wurde nach besonders positiven und nach negativen Erfahrungen beim Umgang mit dem Experiment gefragt. Die Schüler*innen sollten zudem angeben, ob sie immer wussten, was sie machen sollen. Es wurde nach konkreten Stellen gefragt, die unklar waren, und es wurden Verbesserungswünsche erfragt. Die Schüler*innen haben die Abwurfmaschine für den Papierflieger

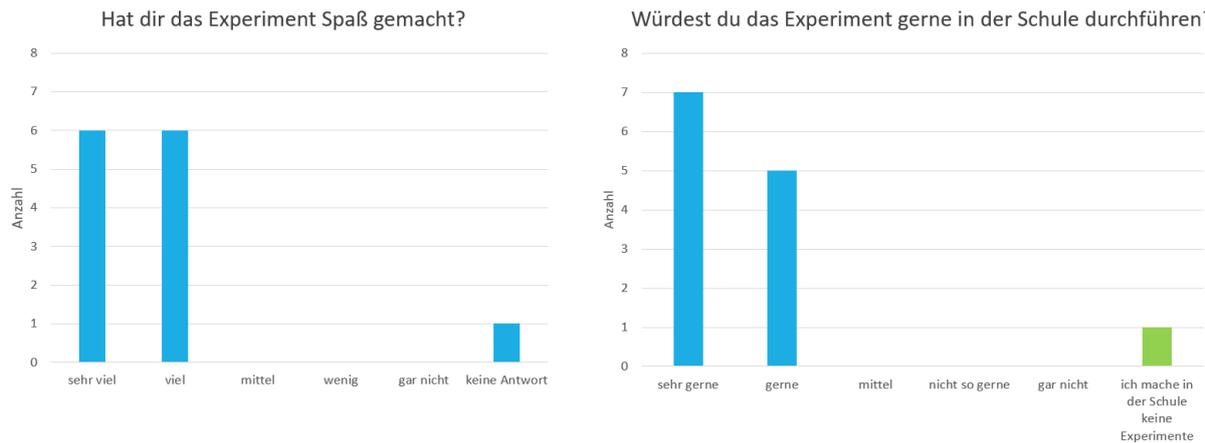


Abb. 4: Ergebnisse der Fragebogenitems zum Spaßfaktor. Die grün gekennzeichnete Antwort war in dem Fragebogen nicht vorgesehen, aber eine Person hat die Antwort gegeben, anstatt eine vorgegebene Antwort anzukreuzen.

als besonders positiv empfunden, ebenso hat ihnen das Basteln viel Spaß gemacht und das Beobachten der Fallschirme beim Fallen wurde ebenfalls bei den positiven Punkten erwähnt. Als negativer Punkt wurde genannt, dass die Papierflieger nicht bei allen Schüler*innen gut geflogen sind. Der hohe Zeitaufwand zum Basteln der Fallschirme wurde ebenfalls negativ angemerkt. Die Schüler*innen haben nur selten nicht gewusst, was sie in dem Experiment machen sollten. Einer Person war ein Bastelschritt unklar und einer anderen Person eine Formulierung auf dem Arbeitsblatt. Die entsprechenden Passagen wurden danach angepasst.

Die Schüler*innen haben zudem noch bewertet, welche Titel für Lernzirkelstationen für sie attraktiv sind. Bei dem Item zum sonstigen Feedback haben zwei Schüler*innen angegeben, dass es sehr viel Spaß gemacht hat.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass die Schüler*innen viel Spaß an den einzelnen Stationen hatten. Ihr Feedback hat zu einer Überarbeitung der Arbeitsblätter und Anleitungen geführt. Aufbauend auf den Erfahrungen kann man hoffen, dass auch Schüler*innen im Schulunterricht Spaß an den Lernzirkelstationen haben könnten. Über die Lernwirksamkeit kann derzeit keine Aussage getroffen werden.

5. Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurden drei Lernzirkelstationen zur Förderung der Variablenkontrollstrategie (VKS) bei Mittelstufenschüler*innen vorgestellt. Die Experimente der Lernzirkelstationen sollten dabei mit wenigen und kostengünstigen Materialien auskommen. Die drei Lernzirkelstationen sind dem Inhaltsfeld Mechanik zugeordnet. Sie wurden im Rahmen eines regionalen Ferienangebots getestet. Dabei haben die Experimente der Stationen ein positives Feedback von den Schüler*innen bekommen.

Für die Zukunft bieten sich mehrere Ansatzpunkte, um das Konzept von Lernzirkelstationen zur Förde-

rung der VKS mit geringem Materialaufwand weiterzuentwickeln. Zunächst sollten die vorgestellten Stationen im Schulunterricht in den angedachten Jahrgangsstufen eingesetzt und erprobt werden. Durch das Feedback der Schüler*innen und Lehrkräfte können die entwickelten Lernzirkelstationen weiter verbessert werden. Außerdem können weitere Stationen mit einem geringen Materialaufwand konzipiert werden. Dazu bieten sich auch andere Themengebiete der Physik wie die Optik oder Akustik an. Der Einsatz digitaler Simulationen kann ebenfalls das Lernzirkelangebot bereichern. Eine weitere Option besteht darin, nicht komplett auf Sammlungsmaterial zu verzichten, sondern zu überprüfen, ob es typische Sammlungsmaterialien in vielen Schulen gibt, so dass diese Materialien für entsprechende Lernzirkelstationen sicher eingeplant werden können.

Zusammenfassend stellt das Konzept der Lernzirkelstationen mit geringem Materialaufwand eine gute Möglichkeit dar, die experimentellen Kompetenzen und dabei insbesondere die VKS zu fördern. Es wird deutlich, dass auch für ein geringes Budget geeignete Experimente realisierbar sind. Dabei gibt es noch viel Potential für die Umsetzung weiterer Experimente in Lernzirkelstationen.

6. Literatur

- Breuer, J. (2021). Implementierung fachdidaktischer Innovationen durch das Angebot materialgestützter Unterrichtskonzeptionen. Fallanalysen zum Nutzungsverhalten von Lehrkräften am Beispiel des Münchener Lehrgangs zur Quantenmechanik. Berlin: Logos Verlag.
- Chen, Z.; Klahr, D. (1999). All Other Things Being Equal: Acquisition and Transfer of the Control of Variables Strategy. In: Child Development 70(5), S. 1098–1120.
- Goertz, S. (2022). Module und Lernzirkel der Plattform FLexKom zur Förderung experimenteller Kompetenzen in der Schulpraxis - Verlauf und Ergebnisse einer Design-Based Research Studie. Berlin: Logos Verlag.

- MSW; Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen, Hrsg. (2019). Kernlehrplan für die Sekundarstufe I Gymnasium in Nordrhein-Westfalen – Physik. 1. Auflage. Düsseldorf: Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen.
- KMK; Ständige Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland, Hrsg. (2024). Weiterentwickelte Bildungsstandards in den Naturwissenschaften für das Fach Physik (MSA). Beschluss der Kultusministerkonferenz vom 16.12.2004 i.d.F. vom 13.06.2024.
- Schwichow, M. (2015). Förderung der Variablenkontroll-Strategie im Physikunterricht. Diss. Kiel: Christian-Albrecht-Universität.
- Staaacks, S.; Heinke, H.; Stampfer, C. (2017). Die akustische Stoppuhr in phyphox. In: MNU Journal 70 (5), S. 322-327.
- Staaacks, S.; Hütz, S.; Heinke, H.; Stampfer, C. (2018). Advanced tools for smartphone-based experiments: phyphox. In: Physics Education 53.
- Streller, S.; Bolte, C.; Dietz, D.; Noto La Diega, R. (2019). Didaktische Reduktion und Elementarisierung. In: Chemiedidaktik an Fallbeispielen: Anregungen für die Unterrichtspraxis. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 11–16.
- Winkens, T.; Atahan, S.; Heinke, H. (2024). Variablenkontrollstrategie: Individuelle Förderung hoch 2. In: Frühe naturwissenschaftliche Bildung. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Jahrestagung in Hamburg 2023. Hrsg. von H. von Vorst, S. 362–365.
- Winkens, T.; Heinke, H. (2023). Diagnose von Kompetenzfacetten zur Variablenkontrollstrategie. In: PhyDid B- Didaktik der Physik- Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung in Hannover, S. 177–183.
- Winkens, T.; Heinke, H. (2024). Arbeitsblattvorlagen als Mittel zur differenzierten Förderung der Variablenkontrollstrategie. In: PhyDid B- Didaktik der Physik- Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung in Greifswald, S. 131–138.

Praxiserfahrung mit Versuchsaufbauten zur Quantenoptik und Konzeption einer didaktisch reduzierten Versuchsanleitung

Nils Thormann*, Sebastian Nell*, Ralf Detemple*, Heidrun Heinke*

*I. Physikalisches Institut IA, RWTH Aachen University
nils.thormann1@rwth-aachen.de

Kurzfassung

Mit der stetig anwachsenden Relevanz der Quantenphysik für die moderne Technologiesellschaft zeichnet sich auch deutlich der Auftrag an die Schulen und Hochschulen ab, diesem Feld der Physik eine zunehmende Bedeutung einzuräumen. Gerade experimentelle Zugänge zur Quantenphysik gilt es fortschreitend auszubauen, um Lernenden einen praktischen Zugang zu grundlegenden Konzepten zu eröffnen. Mit dem Quantum Optics Educational Kit der Firma Thorlabs® wird ein solcher Zugang zur Quantenoptik als einem von hoher Aktualität geprägten Forschungsfeld der Quantenphysik eröffnet. Mit der Zielsetzung, auf Grundlage des Benutzerhandbuchs zum Kit eine didaktisch reduzierte Versuchsanleitung zu konzipieren, wurden zunächst erste Praxiserfahrungen mit den Versuchsaufbauten gesammelt. In einem weiteren Schritt wurden dann die theoretischen Grundlagen elementar reduziert und Videoanleitungen zu zentralen Schritten der Montage beziehungsweise Justage erstellt. Durch gezielte Adaption der vorgesehenen Versuchsanordnung kann in der konzipierten Anleitung der Ausgangsaufbau und folglich das Anforderungsniveau variiert werden.

1. Motivation und Zielsetzung

Die Quantenphysik ermöglichte es, zentrale Technologien der modernen Gesellschaft zu erschließen. Gerade im Jahr 2025, dem einhundertjährigen Jubiläum der Formulierung der Quantenmechanik, wird die nach wie vor unverändert hohe Aktualität durch die Erklärung zum Internationalen Jahr der Quantenwissenschaft und -technologie deutlich bezeugt. Das Quantencomputing oder die Quantenkryptographie sind nur zwei von vielen revolutionären Ansätzen, die die Quantenphysik zu einem zukunftssträchtigen Feld der Physik machen (vgl. DPG, 2025).

Erneut bestätigt sich dadurch auch, dass der Quantenphysik sowohl in der Schule als auch in der Hochschule eine zunehmende Relevanz zukommt. Besonders die Quantenoptik ist dabei ein Forschungszweig der Quantenphysik, dem in Hinblick auf ihm entspringende quantentechnologische Anwendungen eine besondere Rolle zukommt. Ein fortwährendes Ziel ist es deshalb, das Repertoire an zur Verfügung stehenden experimentellen Zugängen für Schülerinnen und Schüler sowie Studierende stets zu erweitern. Einen geeigneten experimentellen Zugang für Schülerinnen und Schüler der gymnasialen Oberstufe sowie Studierende früher Semester in physikalischen oder physiknahen Studiengängen bietet das Quantum Optics Educational Kit der Firma Thorlabs® mit verschiedenen Versuchen zur Quantenoptik. Das Kit ermöglicht einen ersten Kontakt mit den Grundlagen der Quantenoptik und entsprechenden Versuchsaufbauten. Das zugehörige Handbuch des Herstellers (vgl. Thorlabs®, 2023), das viele mit dem Versuchs-Kit mögliche Versuche sowie deren theoretische

Grundlagen umfasst, ist dabei als Versuchsanleitung für meist zeitlich stark begrenzte Versuchspraktika und Schülerangebote sehr umfangreich und für beide Zielgruppen nach unseren Erfahrungen auch sehr anspruchsvoll.

Deshalb wurde aufbauend auf dem Handbuch des Versuchs-Kits eine didaktisch reduzierte Versuchsanleitung zu fünf Experimenten des Kits konzipiert. Hierfür wurden die zu Grunde liegenden physikalisch-theoretischen Inhalte elementar reduziert, sodass allen Lernenden ein zielgruppengerechter Zugang möglich ist. Bestandteil der Versuchsanleitung sind zudem Videoanleitungen zu zentralen Montage- und Justagevorgängen, um gerade diese oft herausfordernden Tätigkeiten im Umgang mit optischen Aufbauten gezielt zu unterstützen. Außerdem wurde die im Handbuch vorgeschlagene Versuchsanordnung so adaptiert, dass je nach Lerngruppe in Abhängigkeit von der Präparation des Ausgangsaufbaus der vorgesehene Montage- und Justageaufwand und somit das Anforderungsniveau variabel gestaltet werden kann.

2. Physikalischer Hintergrund zu den adressierten Versuchen

Ohne den Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben, wird nachfolgend ein sehr komprimierter Überblick über die physikalisch-theoretischen Hintergründe gegeben, die den Versuchen des Kits zu Grunde liegen. Dabei stehen die Zustände von Licht, Indikatoren zur Klassifikation von Lichtquellen sowie die zugehörigen Versuchsaufbauten im Fokus.

2.1. Lichtzustände

In der quantenmechanischen Beschreibung des Lichts werden verschiedene Lichtzustände unterschieden. Für die behandelten Experimente sind dabei drei ausgewählte Zustände von Relevanz.

Der erste und grundlegendste Zustand ist der Fock-Zustand $|n\rangle$. Das elektromagnetische Feld, dessen Moden sich in der Quantenmechanik durch quantenmechanische harmonische Oszillatoren beschreiben lassen, wird in Energiequanten der Größe $\hbar\omega$ angeregt (vgl. Beck, 2012, S. 387-389). Diese werden durch Photonen vermittelt, sodass ein einzelnes Photon als grundlegende Feldanregung aufgefasst werden kann. Der Fock-Zustand $|n\rangle$ gibt Auskunft darüber, dass exakt n Photonen in einer Mode vorhanden sind. Folglich entspricht $|1\rangle$ einem einzelnen Photon, währenddessen $|0\rangle$ als Vakuumzustand bezeichnet wird (vgl. Beck, 2012, S. 286). Die exakte Anzahl von n Photonen beim Fock-Zustand $|n\rangle$ lässt sich auch (mit Verzicht auf die Angabe der zugehörigen Berechnung) mithilfe des entsprechenden Erwartungswertes für den Besetzungszahloperator \hat{n} und der zugehörigen Standardabweichung belegen (vgl. LaPierre, 2022, S. 41):

$$\langle \hat{n} \rangle = n \quad \{1\}$$

$$\Delta \hat{n} = 0 \quad \{2\}$$

Eine weitere Kategorie bilden die kohärenten Zustände. Ein kohärenter Zustand $|\alpha\rangle$ lässt sich als Superposition von Fock-Zuständen auffassen:

$$|\alpha\rangle = e^{-|\alpha|^2/2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\alpha^n}{\sqrt{n!}} |n\rangle \quad \{3\}$$

Anders als beim Fock-Zustand ergibt sich für den Erwartungswert des Besetzungszahloperators \hat{n} und die zugehörige Standardabweichung (vgl. LaPierre, 2022, S. 94-96):

$$\langle \hat{n} \rangle = |\alpha|^2 \quad \{4\}$$

$$\Delta \hat{n} = |\alpha| = \sqrt{\langle \hat{n} \rangle} \quad \{5\}$$

Entsprechend lässt sich der Photonenzahl eine Wahrscheinlichkeitsverteilung P_n zuordnen (vgl. LaPierre, 2022, S.97):

$$P_n = e^{-\langle \hat{n} \rangle} \frac{\langle \hat{n} \rangle^n}{n!} \quad \{6\}$$

Den letzten zu betrachtenden Zustand bildet der inkohärente Zustand. Quellen inkohärenten Lichts emittieren dabei eine Überdeckung unabhängiger Zustände:

$$|\psi\rangle = |\alpha_1\rangle \otimes |\alpha_2\rangle \otimes \dots \otimes |\alpha_l\rangle \dots = \prod_l |\alpha_l\rangle \quad \{7\}$$

$$|\alpha_l\rangle = |\alpha_l| e^{i\varphi_l} \quad \{8\}$$

Die einzelnen Zustände besitzen eine zufällig verteilte Phase φ_l (vgl. LaPierre, 2022, S. 115).

Werden auch hier der Erwartungswert sowie die Standardabweichung betrachtet, ergibt sich:

$$\langle \hat{n} \rangle = \frac{1}{e^{\hbar\omega/kT} - 1} \quad \{9\}$$

$$\Delta \hat{n} = \sqrt{\langle \hat{n} \rangle (\langle \hat{n} \rangle + 1)} \quad \{10\}$$

Das Ergebnis für $\langle \hat{n} \rangle$ ist als Bose-Einstein-Verteilung für Photonen bekannt. Auch im Falle des inkohärenten Zustands lässt sich der Photonenzahl wieder eine Wahrscheinlichkeitsverteilung zuordnen (vgl. LaPierre, 2022, S.119-121):

$$P_n = \frac{\langle \hat{n} \rangle^n}{(1 + \langle \hat{n} \rangle)^{n+1}} \quad \{11\}$$

Die drei in diesem Abschnitt vorgestellten Lichtzustände unterscheiden sich somit grundlegend hinsichtlich ihrer den Photonenzahlen zugeordneten Wahrscheinlichkeitsverteilungen sowie der jeweiligen Erwartungswerte und Standardabweichungen für den Besetzungszahloperator. Diese Eigenschaften werden im Folgenden genutzt, um den Lichtzustand im Experiment zu klassifizieren.

2.2. Korrelationsfunktion zweiter Ordnung als Indikator für den Lichtzustand

Es stellt sich die Frage, wie der Lichtzustand experimentell bestimmt werden kann und welcher Klasse von Lichtquellen eine vorliegende Lichtquelle zuzuordnen ist.

Ein mathematisches Instrument, im Experiment aufgenommene Messdaten dahingehend auszuwerten, ist die Korrelationsfunktion zweiter Ordnung $g^{(2)}(\tau)$. Werden mit einer zeitlichen Differenz τ getrennt voneinander zwei Intensitäts-Signale derselben Quelle detektiert, so gibt $g^{(2)}(\tau)$ die Korrelation dieser Signale an. $g^{(2)}(0)$ untersucht folglich die Wahrscheinlichkeit einer exakten Korrelation zweier Signale ohne Zeitdifferenz, also jene eines Koinzidenzereignisses. Klassisch wird sie daher festgelegt durch (vgl. LaPierre, 2022, S. 66):

$$g^{(2)}(\tau) = \frac{\langle I(t)I(t+\tau) \rangle}{\langle I(t) \rangle^2} \quad \{12\}$$

$$\Rightarrow g^{(2)}(0) = \frac{\langle I^2 \rangle}{\langle I \rangle^2} \quad \{13\}$$

$\langle \cdot \rangle$ kennzeichnet hier, dass Durchschnittswerte betrachtet werden. Wird ein Blick auf die quantenmechanische Definition von $g^{(2)}(0)$ geworfen, so ergibt sich der Zusammenhang zum Inhalt des vorherigen Abschnitts (vgl. LaPierre, 2022, S. 67):

$$g^{(2)}(0) = 1 + \frac{(\Delta \hat{n})^2 - \langle \hat{n} \rangle}{\langle \hat{n} \rangle^2} \quad \{14\}$$

Mithilfe dieses mathematischen Indikators kann bei Untersuchung der Korrelation zweier Signale einer unbekanntem Lichtquelle experimentell ermittelt

werden, um welche Art von Lichtquelle es sich handelt. Für die betrachteten Zustände von Licht ergeben sich nämlich Unterschiede, was sich bei Berechnung von $g^{(2)}(0)$ mit den jeweiligen Erwartungswerten des Besetzungszahloperators \hat{n} und der zugehörigen Standardabweichung zeigt (vgl. LaPierre, 2022, S.122):

$$g_{Fock}^{(2)}(0) = 1 + \frac{(0)^2 - n}{n^2} = \frac{n-1}{n} < 1 \quad \{15\}$$

$$g_{Kohärent}^{(2)}(0) = 1 + \frac{\langle \hat{n} \rangle - \langle \hat{n} \rangle}{\langle \hat{n} \rangle^2} = 1 \quad \{16\}$$

$$g_{Inkohär.}^{(2)}(0) = 1 + \frac{\langle \hat{n} \rangle (\langle \hat{n} \rangle + 1) - \langle \hat{n} \rangle}{\langle \hat{n} \rangle^2} = 2 \quad \{17\}$$

Diese Überlegungen zur Klassifikation des Lichtzustands sollen nun experimentell realisiert werden. Hierzu werden zwei sehr prominente Versuchsaufbauten diskutiert, mit denen sich ebenfalls vier der fünf betrachteten Experimente im Kit durchführen lassen.

2.3. Das Hanbury-Brown-Twiss Experiment

Das Hanbury-Brown-Twiss Experiment (im Folgenden HBT-Experiment) ermöglicht die experimentelle Untersuchung des Lichtzustands mithilfe der Korrelationsfunktion zweiter Ordnung und benötigt nur wenige Komponenten. Das Licht der zu klassifizierenden Lichtquelle trifft auf einen Strahlteiler, an dessen beiden Ausgängen je ein Detektor positioniert wird. Mithilfe einer Koinzidenzelektronik werden die Detektorsignale ausgewertet. Der Versuchsaufbau des HBT-Experiments ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt.

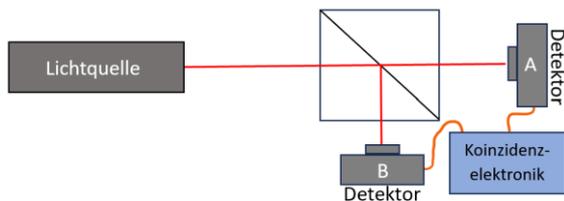


Abb. 1: Versuchsaufbau für das HBT-Experiment (eigene Darstellung nach Thorlabs®, 2023, S. 115)

Die Koinzidenzelektronik berechnet in diesem Aufbau mithilfe von $g^{(2)}(0)$ die Signalkorrelation zwischen beiden Ausgängen des Strahlteilers. Anhand dieser lässt sich dann ablesen, welcher Lichtzustand vorliegt. Ergibt die Auswertung $g_{AB}^{(2)}(0) \geq 1$ (der Index steht für die Detektoren A und B), so handelt es sich um eine klassische Lichtquelle. Liegt hingegen ein Ergebnis mit $g_{AB}^{(2)}(0) < 1$ vor, so ist die Lichtquelle nicht-klassisch. Licht im Zustand $|1\rangle$, also ein einzelnes Photon, liefert (vgl. LaPierre, 2022, S. 68):

$$g_{Fock}^{(2)}(0) = \frac{n-1}{n} = 0 \text{ für } n=1 \quad \{18\}$$

Vor dem Hintergrund des Versuchsaufbaus mit dem Strahlteiler und der Quantennatur des Lichts lässt sich

verstehen, warum für eine nicht-klassische Lichtquelle ein Wert kleiner als 1 und für ein einzelnes Photon der Wert 0 berechnet wird. Die Messung am Detektor verändert den Zustand des Photons, was die Wahrscheinlichkeit von Messungen in Koinzidenz herabsetzt. Im Falle eines einzelnen Photons kann somit schlicht kein Koinzidenzereignis stattfinden, da es sich zum Zeitpunkt der Messung, in dem der Zustand verändert wird, nicht zugleich am anderen Detektor befinden kann (vgl. LaPierre, 2022, S. 68).

2.4. Das Grangier-Roger-Aspect Experiment

Ein inzwischen klassischer Versuch zur Untersuchung von Einzelphotonen am Strahlteiler wurde von Grangier, Roger und Aspect durchgeführt und ist folglich als Grangier-Roger-Aspect Experiment (im Folgenden GRA-Experiment) bekannt. Ziel war es, die quantenmechanische Vorhersage $g^{(2)}(0) = 0$ experimentell zu bestätigen (vgl. Grangier et al., 1986, S. 173).

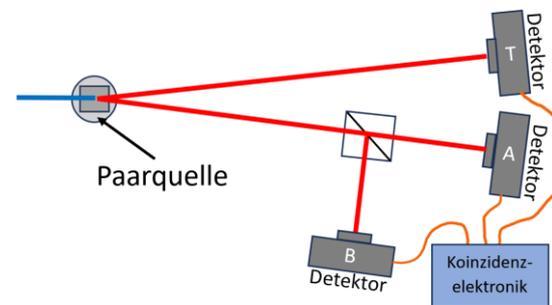


Abb. 2: Versuchsaufbau für das GRA-Experiment (eigene Darstellung nach Thorlabs®, 2023, S. 118)

Der in Abbildung 2 zu sehende Versuchsaufbau ähnelt hierbei stark jenem des HBT-Experiments und verfolgt dasselbe Ziel. Als Lichtquelle fungiert eine Paarquelle, die im Kit zeit- und energieverschränkte Einzelphotonen-Paare emittiert. Intuitiv lässt sich vermuten, dass dementsprechend jeder der beiden Arme der Paarquelle eine separate Quelle für Einzelphotonen ist. Diese Annahme führt zu der Fragestellung, warum nicht das HBT-Experiment mit einem Arm der Paarquelle ausreicht, um Einzelphotonen am Strahlteiler zu untersuchen. Auf Abbildung 2 übertragen konkretisiert sich die Frage dahingehend, welche Funktion Detektor T erfüllt, wo sich doch im unteren Arm das HBT-Experiment präsentiert (vgl. Thorlabs®, 2023, S. 23).

Die Antwort auf diese Frage liefert die quantenmechanische Betrachtung des Detektionsprozesses. Die Paarquelle emittiert die beiden Photonen des Paares simultan. Hintergrund ist die parametrische Fluoreszenz (spontaneous parametric down-conversion, SPDC) im verwendeten Typ-I-Betabariumborat (im Folgenden BBO-Kristall), einem nichtlinearen Kristall (vgl. LaPierre, 2022, S. 52). Die simultane Emission hat zur Folge, dass eine Detektion an Detektor T ein Indikator dafür ist, dass ein weiteres Photon zeitgleich im unteren Arm der Paarquelle vorhanden ist (vgl. Thorlabs®, 2023, S. 23). Wird bei Detektor T eine Messung am Photon durchgeführt, so wird als

Folge des Messvorgangs unmittelbar der Kollaps des verschränkten Gesamtsystems herbeigeführt. Erst dadurch kollabiert das Photon im unteren Arm von einem vor der Messung nicht klar bestimmten Zustand in den Fock-Zustand (vgl. Beck, 2012, S. 170). Ohne Messung bei T liegt im unteren Arm kein Einzelphotonenzustand vor (vgl. Beck, 2012, S. 450). Diese Betrachtung begründet, warum die beiden Arme nicht isoliert als Einzelphotonenquelle dienen und warum folglich ein Aufbau mit drei Detektoren bei der Verwendung von Paarquellen notwendig ist.

Übersetzt in die Korrelationsfunktion zweiter Ordnung bedeutet das, dass nur Ereignisse an den Detektoren A und B von Relevanz sind, bei denen ebenfalls eine Detektion an T stattgefunden hat. Für diese gilt $g_{TAB}^{(2)}(0) \geq 1$. Da sich das Photon im unteren Arm am Strahlteiler, wenn es nach der Detektion des anderen Photons an T in den Fock-Zustand kollabiert ist, analog zu den Betrachtungen beim HBT-Experiment verhält (keine Korrelation zwischen A und B), folgt für das GRA-Experiment $g_{TAB}^{(2)}(0) = 0$ (vgl. Thorlabs®, 2023, S. 23-24).

Die konkrete Übersetzung der Detektorsignale in die Korrelationsfunktion zweiter Ordnung berechnet sich dabei wie folgt (vgl. Beck, 2012, S. 455):

$$g_{TAB}^{(2)}(0) = \frac{N_{TAB}(0) \cdot N_T}{N_{TA}(0) \cdot N_{TB}(0)} \quad \{19\}$$

$N_{TA}(0)$, $N_{TB}(0)$ und $N_{TAB}(0)$ sind die jeweiligen Zählraten der Koinzidenzen zwischen den zum Index korrespondierenden Detektoren und N_T ist die Zählrate des Detektors T.

2.5. Gesetz von Malus für Einzelphotonen

Eines der fünf ausgewählten Experimente des Kits untersucht die Polarisierungseigenschaft von Einzelphotonen. Als zentrales Resultat einer quantenmechanischen Betrachtung für die Übertragungswahrscheinlichkeit $P(\theta|\phi)$ am linearen Polarisator (also die Wahrscheinlichkeit dafür, dass das Photon transmittiert statt absorbiert wird) ergibt sich ein klassisches Ergebnis. Konkret handelt es sich für hohe Anzahlen an Photonen um das klassische Gesetz von Malus (vgl. Thorlabs®, 2023, S. 29-30):

$$P(\theta|\phi) = \cos^2(\Delta\varphi) \quad \{20\}$$

Dabei beschreibt $\Delta\varphi$ den Winkel zwischen der Polarisationsrichtung des Photons und der Polarisationsachse des linearen Polarisators. Ziel des Versuchs im Kit ist es, eben jenes Resultat experimentell zu bestätigen.

3. Experimentelle Einblicke

Im folgenden Abschnitt werden experimentelle Erfahrungen präsentiert, welche eine wichtige Grundlage für die Konzeption der Versuchsanleitung darstellen.

3.1. HBT-Experiment mit abgeschwächtem Laserlicht

Als Einstiegsexperiment wählt das beiliegende Handbuch das HBT-Experiment mit abgeschwächtem Laserlicht (vgl. Thorlabs®, 2023, S. 112). Der Versuchsaufbau gleicht dabei jenem in Abbildung 1, wobei auf den Eingang des Strahlteilers ein Neutraldichtefilter aufgeschraubt wird. Als Lichtquelle fungiert der Justagelaser des Kits, dessen Licht dementsprechend bei Transmission des Filters stark abgeschwächt wird.

Mit dem Experiment soll untersucht werden, ob eine Abschwächung eines Lasers bereits eine Quelle für Einzelphotonen liefert, was einer gängigen, intuitiven Vorstellung von Licht als Photonenstrom entspricht (vgl. Thorlabs®, 2023, S. 112). Laser sind jedoch kohärente Lichtquellen unabhängig von der Abschwächung des Laserlichts (vgl. Beck, 2012, S. 452). Der vorgestellten Theorie folgend ist es ausreichend, im HBT-Experiment die Korrelation der Detektorsignale ($g_{AB}^{(2)}(0)$) zu untersuchen, um eine Aussage darüber treffen zu können, ob durch die Abschwächung eine Einzelphotonenquelle vorliegt. An dieser Stelle sei noch erwähnt, dass im Versuchs-Kit keine klassische Koinzidenzelektronik, sondern ein Time Tagger zum Einsatz kommt (vgl. Thorlabs®, 2023, S. 38).

Es wurde eine Messreihe mit zehn Messungen à 300 s aufgenommen, welche in Abbildung 3 dargestellt ist (grau: Fehlerbalken, die der Standardabweichung entsprechen).

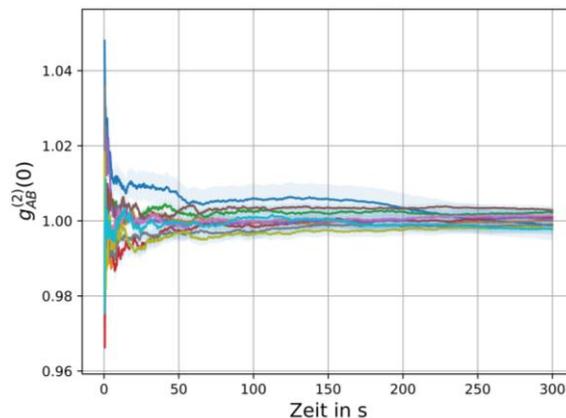


Abb. 3: HBT-Experiment mit abgeschwächtem Laser; 10 Messungen à 300 s (grau: Standardabweichung) (eigene Darstellung)

In Abbildung 3 lässt sich erkennen, dass die Signal-Korrelationen im erwarteten Bereich liegen und somit der theoretischen Erwartung aus Gleichung 16 entsprechen. Eine statistische Auswertung der Daten liefert für den Mittelwert mit Standardabweichung $g_{AB}^{(2)}(0) = 1,000 \pm 0,004$. Das Experiment belegt also, dass es sich bei einem abgeschwächten Laser um keine Quelle für Einzelphotonen handelt, sondern eine unverändert kohärente Quelle vorliegt.

Eine Besonderheit dieses Versuchs ist, dass er als eigenständiger Aufbau im Kit vorgesehen ist (vgl. Thorlabs®, 2023). Im weiteren Verlauf wird sich zeigen, dass die Experimente des Kits einen gewissen

grundlegenden Aufbau (vgl. Abb. 5a) schrittweise erweitern oder nur geringfügig adaptieren. Gerade die für Experimentierende mit wenig Vorerfahrungen aufwendige Justage der Detektoren wird nach Handbuch folglich zwei Mal durchgeführt, einmal für den alleinstehenden Aufbau des gerade beschriebenen HBT-Experiments und ein weiteres Mal für den Basisaufbau, an den die weiteren Versuche anknüpfen. Diese Erfahrung wird später die Basis dafür sein, die Versuchsanordnung in der konzipierten Versuchsanleitung dahingehend gezielt zu verändern.

3.2. GRA-Experiment

An das Resultat des vorherigen Experiments anknüpfend widmet sich das GRA-Experiment der Frage, ob ein BBO-Kristall, gepumpt durch einen Pumplaser, eine Quelle für Einzelphotonen ist. Dazu wird zunächst der bereits erwähnte Basisaufbau montiert, der in Abbildung 5a zu sehen ist. Mithilfe eines Justagelasers, der über einen einsetzbaren Spiegel auf den Strahlengang des eigentlichen Pumplasers eingekoppelt werden kann, werden die Detektoren T und A in den Armen der Paarquelle platziert sowie justiert. Dabei nutzt das Kit ein Axicon, was „den Kegel der im BBO-Kristall erzeugten Photonenpaare emuliert“ (Thorlabs®, 2023, S. 180) und somit eine Justage mit dem Justagelaser ermöglicht, wenn es an der späteren Position des BBO-Kristalls eingesetzt wird.

Der Pumplaser wird über Spiegel umgelenkt und trifft dann an der Position des Axicons auf den BBO-Kristall. Dass die beiden Strahlengänge, also jener von Pump- und jener vom Justagelaser, exakt übereinstimmen wird darüber sichergestellt, dass beide an der Strahlenfalle und der Irisblende vor dem Halter für BBO-Kristall beziehungsweise Axicon identisch zentriert werden.

Diesen Basisaufbau erweiternd wird das GRA-Experiment, wie es grundlegend auch in Abbildung 2

skizziert ist, im nächsten Schritt montiert, was dann dem in Abbildung 5b dargestellten Zustand entspricht. Wie im Abschnitt zum GRA-Experiment erläutert, lässt sich hier nun mit $g_{TAB}^{(2)}$ nachweisen, dass es sich um eine Paarquelle für Einzelphotonen handelt. Eine Messreihe mit fünf Messungen à 120 s zeigt Abbildung 4.

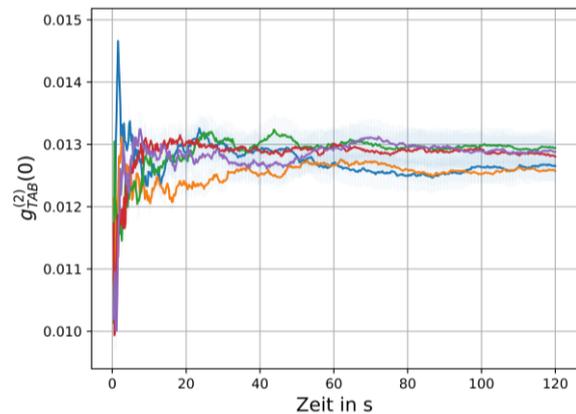


Abb. 4: GRA-Experiment; 5 Messungen à 120 s (grau: Standardabweichung) (eigene Darstellung)

Abbildung 4 zeigt, dass die Signale mit einem Wert für $g_{TAB}^{(2)}(0)$ deutlich kleiner als 1 nicht korreliert sind. Aus der statistischen Datenauswertung für Mittelwert und Standardabweichung folgt $g_{TAB}^{(2)}(0) = 0,01277 \pm 0,00029$. Es wird somit bestätigt, dass mit dem BBO-Kristall eine nicht-klassische Lichtquelle vorliegt. Diese ist eine Einzelphotonenquelle, was eigentlich $g_{TAB}^{(2)}(0) = 0$ erwarten lässt. Zufällige Dreifach-Koinzidenzen verhindern, diesen theoretisch bestimmten Wert im Realversuch exakt nachzuweisen (vgl. Beck, 2012, S. 456). Auch im historischen Experiment, das von Grangier, Roger und Aspect durchgeführt wurde, wurde ein Wert deutlich kleiner als 1, aber dennoch größer als 0 gemessen (vgl. Grangier et al., 1986, S. 173).

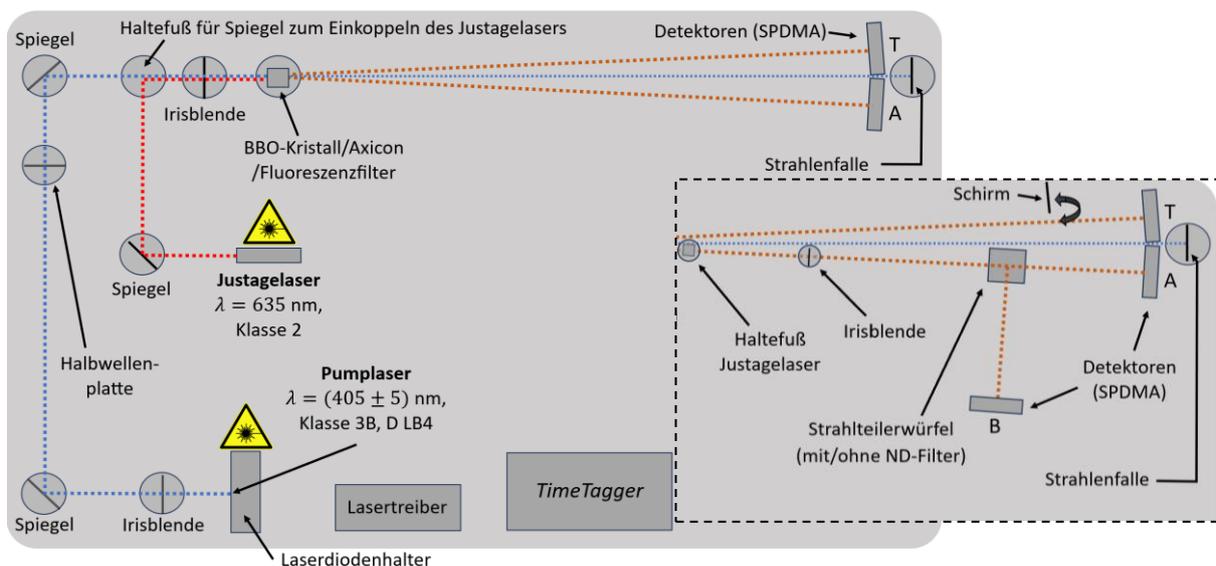


Abb. 5: Optischer Tisch mit links (a) Basisaufbau und rechts gestrichelt umrandet (b) Erweiterung für das GRA-Experiment sowie Erweiterungen (eigene Darstellung nach Thorlabs®, 2023, S. 92)

3.3. HBT-Experiment mit einem Paarquellenarm als Lichtquelle

Aufbauend auf dem Resultat, dass der BBO-Kristall eine Paarquelle für Einzelphotonen ist, soll anschließend die im theoretischen Abschnitt zum GRA-Experiment bereits thematisierte Frage in den Blick genommen werden, ob nicht auch ein einzelner Arm als Quelle für Einzelphotonen herangezogen werden kann. Dazu wird mithilfe des HBT-Experiments im unteren Paarquellenarm dieser als Lichtquelle untersucht. Mit diesem Versuch soll also bei den Lernenden ein Lernprozess dahingehend angestoßen werden, ein Verständnis für die Eigenschaften eines verschränkten Systems sowie den Einfluss des Messprozesses auf seinen Zustand zu entwickeln (vgl. Thorlabs®, 2023, S. 112).

Der Versuchsaufbau reduziert sich darauf, dass vor Detektor T ein Schirm platziert wird (vgl. Abb. 5b). Im unteren Arm präsentiert sich dadurch das HBT-Experiment analog zur Skizze in Abbildung 1. Die Messung an T bleibt aus, sodass das Photon im unteren Arm nicht in den Fock-Zustand kollabiert und sich ein entsprechend klassisches Ergebnis für das HBT-Experiment, also für $g_{AB}^{(2)}$ einstellt.

Für dieses Experiment wurden wieder fünf Messungen à 120 s aufgenommen und in Abbildung 6 dargestellt.

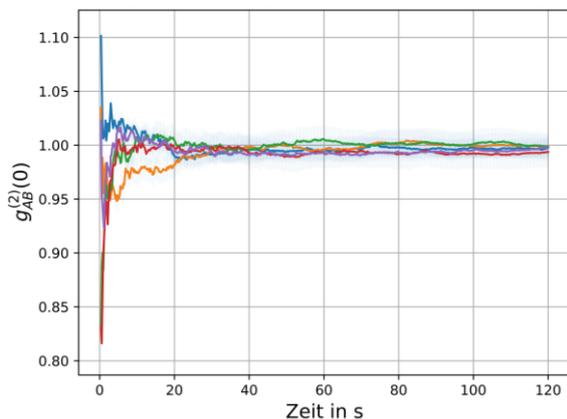


Abb. 6: HBT-Experiment in einem Paarquellenarm; 5 Messungen à 120 s (grau: Standardabweichung) (eigene Darstellung)

Die Auswertung der Daten der aufgenommenen Messreihe liefert $g_{AB}^{(2)}(0) = 0,995 \pm 0,014$.

3.4. GRA-Experiment mit inkohärenter Lichtquelle

Nach Durchführung der beiden Experimente, in denen das Hinzuschalten von Detektor T und somit die Inklusion der dort abgerufenen Informationen über den jeweils erfolgten Messprozess das Ergebnis entsprechend beeinflusste, könnte die Vermutung heranwachsen, dass die alleinige Versuchsanordnung mit drei Detektoren für die nicht-klassischen Ergebnisse verantwortlich ist (vgl. Thorlabs®, 2023, S. 112).

Diese Hypothese soll dadurch überprüft werden, dass in die Anordnung mit allen drei Detektoren, also in das GRA-Experiment, eine inkohärente Quelle als Lichtquelle eingebracht wird. Dazu wird an die Position des BBO-Kristalls ein Fluoreszenzfilter eingesetzt (vgl. Abb. 5). Dieser wird anstelle des BBO-Kristalls mit dem Pumplaser bei verringerter optischer Ausgangsleistung bestrahlt. In dieser Konstellation wurde erneut eine Messreihe mit fünf Messungen à 120 s aufgenommen. Abbildung 7 zeigt die aufgenommenen Messdaten.

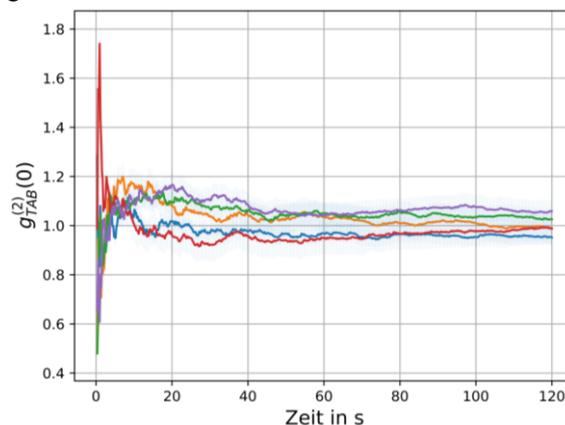


Abb. 7: GRA-Experiment mit inkohärenter Lichtquelle; 5 Messungen à 120 s (grau: Standardabweichung) (eigene Darstellung)

Abbildung 7 lässt erkennen, dass sich mit dem Fluoreszenzfilter ein klassisches Ergebnis einstellt. Werden die Daten statistisch ausgewertet, so ergibt sich $g_{TAB}^{(2)}(0) = 1,02 \pm 0,06$. Dieses Ergebnis zeigt, dass eine klassische Lichtquelle im GRA-Experiment auch klassische Ergebnisse verursacht. Somit entkräftet dieses Experiment die vorausgegangene Vermutung.

Beim Fluoreszenzfilter handelt es sich um eine inkohärente Quelle. Es stellt sich die Frage, warum nicht entsprechend der theoretischen Erwartung aus Gleichung 17 $g_{TAB}^{(2)}(0) = 2$ gemessen wird. Grund dafür ist eine nicht ausreichende Zeitauflösung der Detektoren (vgl. Thorlabs®, 2023, S. 118). Dennoch bestätigt das Ergebnis, dass es sich um eine klassische Lichtquelle handelt.

3.5. Einzelphotonen am linearen Polarisator

Der letzte der fünf betrachteten Versuche untersucht das Verhalten von Einzelphotonen am linearen Polarisator. Dazu wird der in Abbildung 5b zu sehende Aufbau dahingehend erweitert, dass vor Detektor B und somit zwischen diesem und dem Strahlteiler ein linearer Polarisator positioniert wird.

Es stellt sich nun die Frage, wie die Einzelphotonen polarisiert sind, wenn sie den Polarisator erreichen. Die Laserdiode des Pumplasers emittiert Licht, das orthogonal zur Tischebene linear polarisiert ist. An der Halbwellenplatte (vgl. Abb. 5a) wird die Polarisations Ebene um 90° (Einstellung der Halbwellenplatte ist 45°) zu einer Ausrichtung parallel zur Tischebene rotiert. Der BBO-Kristall verursacht eine

weitere Drehung um 90° , sodass die Photonen am linearen Polarisator eine zur Tischebene orthogonale Polarisation aufweisen (vgl. Thorlabs®, 2023, S. 183-184).

In dieser Konstellation gibt die Koinzidenzzählrate N_{TB} die Photonennpaare an, deren einer Partner im unteren Arm der Quelle am linearen Polarisator transmittiert und anschließend detektiert wurde. Die Rate N_{TB} kann folglich als repräsentatives Maß für die Übertragungswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit vom Winkel am Polarisator gedeutet werden. Die Winkeldifferenz berechnet sich aus der eingestellten, drehbaren Polarisationsachse des linearen Polarisators und eben jener festen, zur Tischebene orthogonalen Polarisationsrichtung der Photonen. Wird die Rate N_{TB} gegen den variierenden Winkel am linearen Polarisator aufgetragen, so kann untersucht werden, ob sich die theoretische Vorhersage gemäß dem klassischen Gesetz von Malus bestätigen lässt. Die gleichzeitige Auswertung von $g_{TAB}^{(2)}(0)$ liefert die Gewissheit, dass es sich nach wie vor um Einzelphotonen handelt (vgl. Thorlabs®, 2023, S. 30).

In der in Abbildung 8 gezeigten Messreihe wurde der Winkel am Polarisator im Allgemeinen in 4° -Schritten variiert und die Schrittweite an markanten Stellen (90° , 180° , 270°) zu 2° -Schritten verfeinert. In blau dargestellt ist die Zählrate N_{TB} , in rot sind die Werte für $g_{TAB}^{(2)}(0)$ gezeigt:

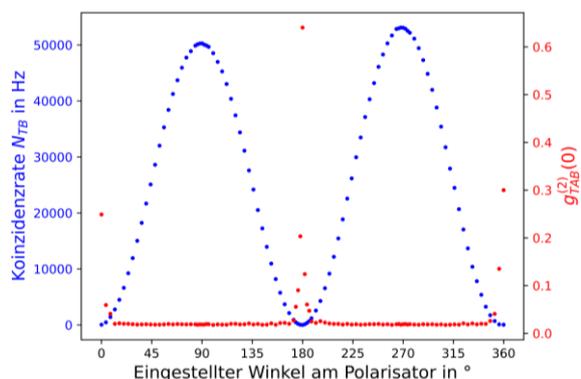


Abb. 8: Einzelphotonen am linearen Polarisator – N_{TB} und Korrelationsfunktion $g_{TAB}^{(2)}(0)$ aufgetragen gegen eingestellten Winkel am Polarisator (eigene Darstellung)

Der nahezu ideale \cos^2 -Verlauf der Zählrate in Abbildung 8 belegt die Gültigkeit des Malus'schen Gesetzes auch auf Einzelphotonenebene – ein anschauliches Beispiel für den Übergang zwischen klassischer und quantenmechanischer Beschreibung. Der \cos^2 -Verlauf ist um 90° verschoben, was sich darauf zurückführen lässt, dass die Polarisationsachse des linearen Polarisators in dessen 0° -Einstellung parallel zur Tischebene (und somit orthogonal zur Polarisationsrichtung der eintreffenden Photonen) ausgerichtet ist. Die Ursache dafür liegt in der Art und Weise der Kalibrierung des Polarisators. Nach dieser ist der Polarisator so ausgerichtet, dass dessen Polarisationsachse in der 0° -Einstellung entweder parallel oder orthogonal zur Tischebene zeigt (vgl. Thorlabs®, 2023, S.

73). Der rote Graph für $g_{TAB}^{(2)}(0)$ belegt, dass es sich um Einzelphotonen handelt. Die Peaks zu den Rändern hin und bei 180° werden durch Rauschen hervorgerufen, das aufgrund der minimalen Zählraten an diesen Positionen verstärkt wird (vgl. Thorlabs®, 2023, S. 120).

Die zu sehende Asymmetrie in den Peaks von N_{TB} wird im Handbuch mit einer randnahen Positionierung des Polarisators erklärt, die dann Strahlabweichungen bedingt. Als Lösung wird eine Justage der Detektoroptik zur Optimierung der Zählrate für den kleineren Peak vorgeschlagen (vgl. Thorlabs®, 2023, S. 189).

4. Konzeption der Versuchsanleitung

Nach den Ergebnissen aus Abschnitt 3 lässt sich festhalten, dass in den betrachteten fünf Experimenten drei wesentliche Schwerpunkte fokussiert werden. Mehrere Versuche widmen sich der Frage nach einer Einzelphotonenquelle. Nachdem diese „gefunden“ wird, werden deren Eigenschaften sowie die benötigten Versuchsanordnungen zum Arbeiten mit dieser Quelle in den Blick genommen. Abschließend sind die Polarisation von Einzelphotonen sowie deren Eigenschaften am linearen Polarisator Lerngegenstand des Versuchs (vgl. Thorlabs®, 2023, S. 115-120).

Auf Grundlage der gesammelten experimentellen Erfahrungen mit dem Kit wurde eine Versuchsanleitung basierend auf dem Benutzerhandbuch erarbeitet. Diese soll sich an Schülerinnen und Schüler der gymnasialen Oberstufe und Studierende physikalischer oder physiknaher Studiengänge in frühen Semestern ihres Studiums richten. Der Anspruch an die Versuchsanleitung besteht folglich darin, beiden Zielgruppen adressatengerecht zu begegnen.

Nach vorangestellten Warnhinweisen insbesondere zum Laserschutz im ersten Kapitel werden die physikalisch-theoretischen Hintergründe thematisiert. Eine Herausforderung in der Konzeption liegt in der Heterogenität der zusammengefassten Zielgruppe. In Bezug auf die Quantenoptik als Spezialfeld der Quantenphysik lässt sich aber in jedem Fall ein limitierter Vorwissenstand aller Zielgruppen antizipieren, vor allem in Bezug auf den mathematischen Formalismus der Quantenmechanik. Dies begründet die Entscheidung für eine didaktische Reduktion für alle Teilzielgruppen. Die theoretischen Inhalte wurden demnach stark elementarisiert, was durch „Beschränkung auf Phänomene[,] zielrelevante Aspekte[,] qualitative Aussagen [und] auf Prinzipien“ (Hopf et al., 2022, S. 67-68) realisiert wurde. Besonders die potentielle Fülle an Formeln wurde gezielt reduziert. An einigen Stellen wurde das (Formel-)Verständnis mit ergänzenden Erläuterungen oder Verbalisierungen unterstützt.

Nach der Beschreibung der Softwareinstallation in einem dritten Kapitel wird der Versuchsaufbau angeleitet. An dieser Stelle wurde in das beschriebene Vorgehen im Handbuch eingegriffen, denn es präsentierte

sich folgendes Problem. Das HBT-Experiment mit abgeschwächtem Laserlicht ist als Einstiegsversuch optimal geeignet. Dies leitet sich aus Empfehlungen von Schecker und Wilhelm ab, wonach bei den Lernenden ein Vorstellungswechsel erzielt wird, indem „auf kognitive Konflikte [gesetzt und] ein Thema mit Aspekten, die konträr zu den Schülervorstellungen stehen“ (Schecker & Wilhelm, 2018, S. 43), begonnen wird. Dieses wird nach Handbuch aber völlig separat zum nachfolgenden Aufbau aus Abbildung 5 aufgebaut, sodass es notwendig würde, die beiden Detektoren ein weiteres Mal in den Armen der Paarquelle für die folgenden Experimente zu positionieren. In Anbetracht der oft begrenzten zeitlichen Ressourcen eines Praktikums- oder Schülerlabortermins wurde deshalb die Versuchsanordnung leicht adaptiert. Ausgenutzt wurde, dass für spätere Interferenzexperimente ein zusätzlicher Haltefuß für den Justagelaser im unteren Arm der Paarquelle positioniert wird (bereits in Abbildung 5b eingezeichnet), um mit diesem das spätere Michelson-Interferometer zu justieren (vgl. Thorlabs®, 2023). Wenn man den Aufbau in Abbildung 5b näher betrachtet, zeigt sich, dass sich mit dem Justagelaser auf dem zusätzlichen Fuß, dem Strahlteiler sowie den beiden Detektoren A und B nach Aufschrauben des Filters das HBT-Experiment ergibt, das nach Handbuch zu Beginn isoliert montiert wird. Der zusätzliche Fuß wird so positioniert, dass der Justagelaser auf den Strahlengang des unteren Paarquellenarms eingekoppelt wird, was ihn automatisch auf den Strahlteiler und die beiden Detektoren, die vorher montiert werden, justiert. Somit wurde für die Versuchsanleitung folgende Entscheidung getroffen. Es wird zunächst der Aufbau in Abbildung 5b montiert, um dann vollumfänglich alle Experimente aufbauend auf diesem Aufbau durchführen zu können. Detektor A und B müssen dadurch nur einmal montiert sowie justiert werden. Durch die Adaption dahingehend, dass alle Versuche vom Basisaufbau (vgl. Abb. 5a) aus starten, kann vorab entschieden werden, ab welchem Punkt die Lernenden den Versuchsaufbau beginnen. Entweder müssen die beiden Detektoren T und A noch in den Armen der Paarquelle positioniert werden oder die Lernenden finden diesen Zustand zu Beginn bereits präpariert vor (vgl. Abb. 5a), sodass mit der Montage des Strahlteilers sowie von Detektor B begonnen wird. Müsste zwischen erstem und den folgenden Versuchen wie nach Handbuch umgebaut werden, wäre eine solche Präparation nicht möglich. Der Aufbau bis hin zum BBO-Kristall ist dabei in beiden sich ergebenden Versuchsvarianten immer fest vorgegeben. Zusätzlich wird dadurch eine Variation des vorgesehenen Montage- und Justageaufwands und somit des Anforderungsniveaus möglich. Lerngruppen mit nur geringfügiger oder keiner praktischen Vorerfahrung im Umgang mit optischen Aufbauten kann so bspw. die Versuchsvariante angeboten werden, in der der Basisaufbau bereits präpariert vorgefunden wird. Nach dem Einstiegsversuch wird in leicht veränderter Reihenfolge und unter

Auslassung eines Versuchs nach Handbuch vorgegangen (vgl. Thorlabs®, 2023, S. 112-113). Zudem wurden Videokomponenten erstellt, die die zentralen Aufbauschnitte für beide Ausgangslagen als Unterstützung zeigen (Hinweis: Thorlabs® hat mittlerweile auch Aufbau-Videos veröffentlicht, die u. a. auf der Website zum Quantenoptik-Kit abrufbar sind).

5. Ausblick

Aufbauend auf experimentellen Erfahrungen mit einem Versuchs-Kit zur Quantenoptik, das speziell für den Bildungsbereich konzipiert wurde, wurde eine didaktisch reduzierte Versuchsanleitung erstellt. Diese Anleitung muss nun erprobt und entsprechend überarbeitet werden, wonach ein Einsatz im Schülerlabor sowie in den physikalischen Praktika der Hochschule geplant ist. Dies wird auch fachdidaktische Studien ermöglichen, inwiefern Lernendenvorstellungen mit dem experimentellen Angebot erfolgreich adressiert werden. Nach ersten Erfahrungen mit der Nutzung des Experiments mit den verschiedenen Zielgruppen wird über die Kapselung jenes Teils des Aufbaus, in dem der Pump laser operiert, entschieden, weil dies den Umgang hinsichtlich des Laserschutzes deutlich vereinfachen kann.

6. Literatur

- Beck, M. (2012). *Quantum Mechanics: Theory and Experiment*. Oxford University Press.
- Deutsche Physikalische Gesellschaft. (2025, 01. April). *Europa und die Zukunft der Quantenwissenschaft*. DPG.
<https://www.dpg-physik.de/veroeffentlichungen/publikationen/stellungnahmen-der-dpg/wissenschaftssystem/europa-und-die-zukunft-der-quantenwissenschaft>
- Grangier, P., Roger, G. & Aspect, A. (1986). Experimental Evidence for a Photon Anticorrelation Effect on a Beam Splitter: A New Light on Single-Photon Interferences. *EPL (Europhysics Letters)*, 1(4), 173-179.
<http://dx.doi.org/10.1209/0295-5075/1/4/004>.
- Hopf, M., Höttecke, D., Schecker, H. & Wiesner, H. (Hrsg.). (2022). *Physikdidaktik kompakt* (1. vollständig neu bearbeitete Aufl.). Aulis Verlag.
- LaPierre, R. (2022). *Getting Started in Quantum Optics*. Springer.
- Schecker, H. & Wilhelm, T. (2018). Strategien für den Umgang mit Schülervorstellungen. In R. Duit, M. Hopf, H. Schecker & T. Wilhelm (Hrsg.), *Schülervorstellungen und Physikunterricht: Ein Lehrbuch für Studium, Referendariat und Unterrichtspraxis* (S. 39-61). Springer.
- Thorlabs® GmbH. (2023). *EDU-QOPI(/M) Quantenoptik-Kit: Benutzerhandbuch*, Stand Mai 2025.
<https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=EDU-QOPI/M>. [Aktuelles Handbuch ist dort verlinkt].

A Fundamental Path to Quantum Physics

- The Space Paradox -

Hans-Otto Carmesin*

*¹Gymnasium Athenaeum, Harsefelder Straße 40, 21680 Stade

²Studienseminar Stade, Bahnhofstr. 5, 21682 Stade

³Universität Bremen, Fachbereich 1, Postfach 330440, 28334 Bremen

hans-otto.carmesin@t-online.de or hans-otto.carmesin.@athenetz.de

Abstract

Quantum physics is a successful field of science with many relevant applications in everyday life. An exciting question is still, what is the fundamental reason for the postulates about quanta?

An answer would provide a deeper insight into nature. Such an insight can sometimes be achieved with help of a paradox. How can we derive the quantum postulates with help of a paradox?

In present-day science, space is usually modelled as a single entity. However, special relativity shows that this view is paradoxical. Instead, space consists of several volume portions that move at the velocity of light. According to the observed isotropy of space at a universal scale, space is a statistical average of rapidly moving volume portions. This solves the paradox. Therefrom, the deeper insight is achieved as follows:

The dynamics of these volume portions is derived. Therefrom, the Schrödinger equation and the quantum postulates are derived. In this manner, the dynamics of space provides the fundamental reason for the postulates about quanta.

In the learning process, the students achieve an intensive awareness, as they experience a cognitive conflict, the paradox. With it, they realize that the basic concept of a single entity of space is insufficient. They realize that the new concept requires rapidly moving volume portions and provides the quantum postulates. A concept for teaching is presented and experiences are reported.

1. Introduction

Why is this topic interesting? Students are interested in space and time, see Muckenfuß (1995). Space is basically described by General Relativity, GR, see Einstein (1915), whereby separate celestial reference systems are needed and proposed by the International Astronomical Union, IAU, see Soffel et al. (2003), Ashby and Patla (2024), Carmesin (2025). Quantum physics, QP, is essential in science and technology. However, Einstein et al. (1935) identified an incompatibility of QP, see Heisenberg (1925), Hilbert (1928), with GR - so the questions arise: How are space and QP related? How is QP founded? A derivation of the quantum postulates and a concept for teaching are provided.

1.1. Method

The hypothetic deductive method is used in the presented learning process and in the underlying scientific investigation, see Kircher et al. (2001), Popper (1935, 2002), Niiniluoto et al. (2004). Thereby, the used hypotheses are

- (1) the observed universal isotropy, see Planck-Collaboration (2020),
- (2) the energy momentum relation in special relativity, SR, see Einstein (1905), Hobson et al. (2006),

- (3) space has no rest mass, see Workman et al (2022, p. 1142),

- (4) space has an energy density, see Perlmutter et al. (1998), Riess et al. (2000), Smoot (2007), Carmesin (2024a-b, 2025).

The deduction part of the method provides the space paradox, the volume dynamics, VD, and the quantum postulates. These hypotheses are very founded. Therefore, there is little risk of failure.

2. Space paradox

The energy density of space is sometimes called u_Λ , corresponding to the cosmological constant Λ , see Einstein (1917). Sometimes, that energy density is called dark energy, u_{DE} , see Huterer and Turner (1999). It describes the energy ΔE in a volume portion (VP) ΔV of nature:

$$u_{DE} = \frac{\Delta E}{\Delta V}. \quad \{1\}$$

Each VP ΔV has zero rest mass, $\Delta m_0 = 0$, and zero rest energy $\Delta E_0 = \Delta m_0 c^2 = 0$. Moreover, each VP at a possible velocity v obeys the energy momentum relation $\Delta E^2 = \frac{\Delta E_0^2}{1-v^2/c^2}$. As the energy density is nonzero, the energy ΔE is nonzero, and the above relation

implies the following form of the energy momentum relation

$$1 - \frac{v^2}{c^2} = \frac{\Delta E_0^2}{\Delta E^2}. \quad \{2\}$$

The zero rest energy $\Delta E_0 = 0$ implies, that the right hand side in Eq. {2} is zero. As a consequence, the velocity of the VP is the velocity c of light in vacuum.

2.1. The paradox

If the volume would be a single entity, then that whole volume would move parallel to some unit direction vector \vec{e} and with the velocity of light, $\vec{v} = c \cdot \vec{e}$. However, that velocity would break the isotropy of space observed at a universal scale. This is a contradiction. In general, a paradox is an apparent contradiction, the solution of which provides a deeper insight. As nature does not contradict itself, this contradiction is apparent, it is a paradox, called the space paradox.

2.2. Solution

The four hypotheses in section 1.1 are very founded empirically. Consequently, the velocity $\vec{v} = c \cdot \vec{e}$ of each VP is very founded. Therefore, there must be several volume portions moving in all directions, so that their velocities average out at a universal scale, see Fig. (1). As a consequence, space is an average of volume portions. Moreover, at a universal scale, the velocities of these volume portions average out. Therefore, space is isotropic at a universal scale, as observed. In this manner, the space paradox is solved.

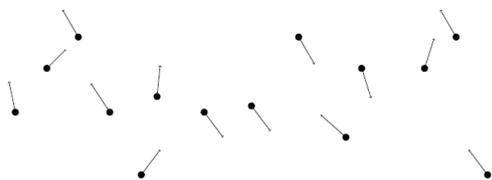


Fig. 1: Volume portions with velocities \vec{v}_j . The average of the velocities is zero, $average(\vec{v}_j) = \vec{0}$, own figure.

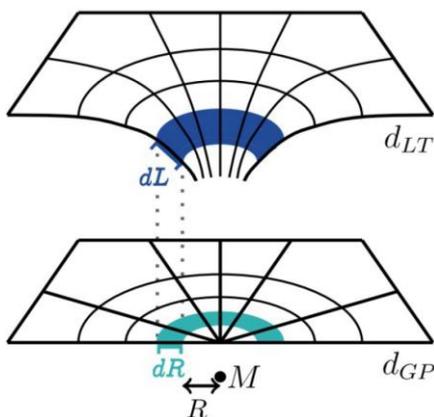


Fig. 2: In the vicinity of a mass M , the radial increment dL is increased with respect to the original increment dR that would occur in the limit M to zero. Note that the increment dL is measured as a light travel distance d_{LT} , and the increment dR is measured as a gravitational parallax distance d_{GP} , see text, own figure.

3. Dynamics of volume portions

A first insight of the paradox is that space is not a single entity. Instead, space consists of volume portions. In order to obtain a deeper insight, we analyse and derive properties of these volume portions. For it, we improve the usual description of curved space with help of metric tensors g_{ij} , see Hobson et al. (2006). For instance, in the vicinity of a mass M , the original radial distance dR is increased by the square root $\sqrt{g_{RR}}$ of the radial element g_{RR} of the metric tensor to a value dL , see Fig. (2),

$$dL = dR \cdot \sqrt{g_{RR}} \quad \{3\}$$

Note that the value dL can be measured as a light travel distance d_{LT} , see Hobson et al. (2006), Note that similarly, the original value dR can be measured with help two hand leads, the distance is called gravitational parallax distance, see Carmesin (2025).

3.1. Additional volume

In order to describe curvature with help of volume portions, we realize that a mass M causes additional volume in its vicinity, see Fig. (2). For instance, in Fig. (2), flat space is illustrated in the lower part, and curved space is shown in the upper part of the figure. Thereby, the curved space is caused by the mass M , and space remains flat at zero mass $M = 0$. E. g. the shell in Fig. (2) with radius R and thickness dR in flat space has the volume $dV_R = 4\pi R^2 dR$. The corresponding shell in the curved space has the volume $dV_L = 4\pi R^2 dL$. The difference of these two volumes is called additional volume δV ,

$$\delta V = dV_L - dV_R = 4\pi R^2 \cdot (dL - dR). \quad \{4\}$$

As another example, a mountain can be described with help of a metric tensor of its surface. Alternatively, the mountain can be described by its volume. It is a volume in addition to the volume of Earth below the mountain. So it is an additional volume. This example illustrates how a mountain can be described with help of a metric tensor or with help of an additional volume.

3.2. Relative additional volume

In general, in order to derive laws of physics, it is valuable to use the ratio of the additional volume $\delta V = dV_L - dV_R$ and of the volume dV_L of curved space in that difference. That ratio is called relative additional volume ϵ_L :

$$\epsilon_L = \frac{\delta V}{dV_L}. \quad \{5\}$$

In fact, inserting Eqs. {3,4} in the relative additional volume in Eq. {5} provides the relative additional volume as a function of the metric tensor element:

$$\epsilon_L = \frac{dL - dR}{dL} = 1 - \frac{1}{\sqrt{g_{RR}}} \quad \{6\}$$

This confirms that the curvature can be described either by the metric tensor or by the additional

volume. The description with the additional volume is compatible with the volume portions that become necessary for the solution of the space paradox. In contrast, the metric tensor does not include the concept of volume portions, and it does not provide the dynamics of the volume portions. As a consequence, the description with the volume portions provides the additional possibility to derive the dynamics of volume portions. Of course, the metric tensor provides the description of time dilations directly, while in the case of volume portions, we can apply the relation $g_{tt} = \frac{1}{g_{RR}}$ of the Schwarzschild (1916) metric. With help of the volume portions, we derive the dynamics of volume portions next:

3.3. Dynamics of volume portions

In this section, the propagation of a volume portion is described in terms of its relative additional volume ε_L , see Fig. (3).

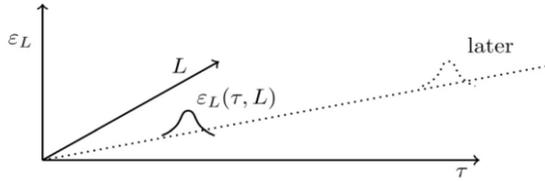


Fig. 3: The relative additional volume ε_L is shown as a function of location L and time τ . Thereby, the location L summarizes the three-dimensional vector \vec{L} in a reduced manner, own figure.

The considered localized volume portion is represented by a relative additional volume $\varepsilon_L(\vec{L}, \tau)$ as a function of a three-dimensional vector \vec{L} representing the location and of the time τ . That function $\varepsilon_L(\vec{L}, \tau)$ has a local maximum, as the VP is localized.

As a consequence, the total change or the total derivative is zero, $d\varepsilon_L(\vec{L}, \tau) = 0$. That is analysed in terms of the partial derivatives,

$$d\varepsilon_L(\vec{L}, \tau) = \frac{\partial \varepsilon_L}{\partial \tau} d\tau + \frac{\partial \varepsilon_L}{\partial \vec{L}} d\vec{L} = 0 \quad \{7\}$$

The VP moves parallel to a corresponding direction unit vector \vec{e}_v . Therefore, during a time $d\tau$, the vector \vec{L} changes by the amount $d\vec{L} = v \cdot d\tau \cdot \vec{e}_v$. With it, the total derivative in Eq. {7} is

$$d\varepsilon_L(\vec{L}, \tau) = \frac{\partial \varepsilon_L}{\partial \tau} d\tau + \frac{\partial \varepsilon_L}{\partial \vec{L}} \cdot v \cdot d\tau \cdot \vec{e}_v = 0. \quad \{8\}$$

The above equation is solved for $\frac{\partial \varepsilon_L}{\partial \tau}$,

$$\frac{\partial \varepsilon_L}{\partial \tau} = -\frac{\partial \varepsilon_L}{\partial \vec{L}} \cdot v \cdot \vec{e}_v, \quad \text{with } v = c. \quad \{9\}$$

This is the differential equation, DEQ, of VPs or of volume dynamics, VD. A Lorentz invariant form of the DEQ is achieved as follows. The square is applied to Eq. {9}, and the right hand side is subtracted,

$$\left(\frac{\partial \varepsilon_L}{\partial \tau}\right)^2 - \left(\frac{\partial \varepsilon_L}{\partial \vec{L}}\right)^2 \cdot c^2 = 0. \quad \{10\}$$

4. Derivation of the Schrödinger equation

In order to derive the Schrödinger (2026) equation, the DEQ of VPs in Eq. {9} is multiplied by (the operator ∂_τ marks $\partial/\partial\tau$, the time derivative is marked by a dot, $\dot{\varepsilon}_L$, the reduced Planck constant is $\hbar = \frac{h}{2\pi}$, the superscript cc marks the complex conjugate)

the operator $i\hbar\partial_\tau$. So, the DEQ of VPs has the form

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial \tau} \dot{\varepsilon}_L = -i\hbar \frac{\partial}{\partial \vec{L}} \dot{\varepsilon}_L \cdot c \cdot \vec{e}_v. \quad \{11\}$$

4.1. Momentum operator

The following plane wave is a solution to the DEQ of VPs in Eq. {11}

$$\varepsilon_L(\vec{L}, \tau) = \exp\left(-i\omega\tau + i \cdot \vec{e}_v \cdot \frac{E}{\hbar c} \cdot \vec{L}\right). \quad \{12\}$$

This is confirmed by inserting. Hereby, the operator $-i\hbar \frac{\partial}{\partial \vec{L}}$ in the DEQ {11} of VPs generates the momentum $\vec{p} = p \cdot \vec{e}_v = \frac{E}{c} \cdot \vec{e}_v$. This is confirmed by inserting the solution in Eq. {12} into the DEQ {11} of VPs. Therefore, the operator $-i\hbar \frac{\partial}{\partial \vec{L}}$ is called momentum operator \hat{p} ,

$$\hat{p} := -i\hbar \frac{\partial}{\partial \vec{L}} \dot{\varepsilon}_L. \quad \{13\}$$

4.2. Schrödinger equation

In the DEQ {11} of VPs, the momentum operator is identified,

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial \tau} \dot{\varepsilon}_L = \hat{p} \cdot \vec{e}_v \cdot c \cdot \dot{\varepsilon}_L. \quad \{14\}$$

The product of the direction unit vector \vec{e}_v and of the momentum operator \hat{p} is the operator of the absolute value of the momentum, as the momentum and the unit vector are parallel, $\hat{p} \cdot \vec{e}_v = \hat{p}$. Moreover, the energy momentum relation of special relativity implies that the product of the momentum and the velocity c of light is the energy. According to Bohr's (1920) correspondence principle, the product $c \cdot \hat{p}$ is equal to the energy operator \hat{E} . Thereby, the energy operator is usually called Hamilton operator \hat{H} .

Moreover, the time derivative of the relative additional volume $\dot{\varepsilon}_L$ is normalized. For it, $\dot{\varepsilon}_L$ is multiplied by a normalisation factor t_n , so that the usual (Sakurai 1994, Kumar 2018) normalization holds,

$$\int (t_n \dot{\varepsilon}_L) \cdot (t_n \dot{\varepsilon}_L)^{cc} dL^3 = 1. \quad \{15\}$$

As a consequence, the DEQ {14} of VPs implies the Schrödinger (1926) equation,

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial \tau} t_n \dot{\varepsilon}_L = \hat{E} t_n \dot{\varepsilon}_L \text{ or } i\hbar \frac{\partial}{\partial \tau} \psi = \hat{E} \psi. \quad \{16\}$$

Hereby, we identify the wave function

$$\psi = t_n \cdot \dot{\varepsilon}_L. \quad \{17\}$$

The Schrödinger equation in eq. {16} has the general form proposed by Schrödinger (1926). In this sense, the derived Schrödinger eq. {16} should hold in general in physics. This is confirmed additionally

by the general applicability of that Schrödinger eq.: All relativistic wave equations in physics can be derived from the Schrödinger equation by using an appropriate particular Hamilton operator for the system under investigation, see Sakurai (1994). Moreover, also the fields in quantum field theory are solutions of the Schrödinger equation, see Carmesin (2024a).

4.3. Schrödinger equation and masses

According to the Higgs (1964) mechanism, mass forms by a phase transition from vacuum, which is represented by VPs more generally, according to the space paradox. As a consequence, the present derivation of the Schrödinger equation includes masses. In particular, the Schrödinger equation {16} describes all relativistic species described in Workman (2022, section 25.2.3). In this sense, the Schrödinger equation {16} is more general than the DEQ derived by Schrödinger (1926), which holds for nonrelativistic objects. Accordingly, we call the Schrödinger equation {16} a generalized Schrödinger equation, GSEQ. Of course, the generalization is a consequence of the Hamilton operator $c \cdot \hat{p} = \hat{E} = \hat{H}$.

4.4. Nonrelativistic Schrödinger equation

The generalized Schrödinger equation {16} implies the nonrelativistic form for the case of relatively slow objects with a rest mass m_0 , a momentum p and a small ratio

$$\frac{p^2}{m_0^2 c^2} \ll 1. \quad \{18\}$$

With it, the energy momentum relation of special relativity $E = \sqrt{p^2 c^2 + m_0^2 c^4}$ can be approximated in linear order in the fraction in Eq. {18},

$$E \doteq E_0 \cdot \left(1 + \frac{p^2}{2m_0^2 c^2}\right) = E_0 + \frac{p^2}{2m_0}. \quad \{19\}$$

In that approximation, the Schrödinger equation, SEQ, {16} has the form

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial \tau} \psi_{E_0} = \left(E_0 + \frac{\hat{p}^2}{2m_0}\right) \psi_{E_0}. \quad \{20\}$$

The wave function ψ_{E_0} includes the description of the rest energy E_0 . Accordingly, we apply a factorization Ansatz,

$$\psi_{E_0} = \exp\left(\frac{E_0 \tau}{i\hbar}\right) \psi. \quad \{21\}$$

Inserting the wave function {21} into the SEQ {20} yields for $i\hbar \frac{\partial}{\partial \tau} \psi_{E_0}$ the equation

$$E_0 \psi_{E_0} + e^{\frac{E_0 \tau}{i\hbar}} i\hbar \partial_\tau \psi = \left(E_0 + \frac{\hat{p}^2}{2m_0}\right) \psi_{E_0}. \quad \{22\}$$

Subtracting $E_0 \psi_{E_0}$ and multiplication of $\exp\left(\frac{-E_0 \tau}{i\hbar}\right)$ implies the nonrelativistic SEQ

$$i\hbar \partial_\tau \psi = \frac{\hat{p}^2}{2m_0} \psi. \quad \{23\}$$

More generally, a potential V can be added,

$$i\hbar \partial_\tau \psi = \frac{\hat{p}^2}{2m_0} \psi + V\psi = \hat{H}\psi. \quad \{24\}$$

4.5. Postulate about the Schrödinger equation

This time-dependent Schrödinger equation represents one of the quantum postulates. Here, we use the formulation of the postulates provided by Kumar (2018, p 168-170). So, postulate 5 is: ‘The time evolution of the state vector is governed by the time-dependent Schrödinger equation {24}, where \hat{H} is the Hamilton operator corresponding to the total energy of the system.’ As we derived this postulate, we explained its origin and its foundation. Therefore, that postulate becomes a derived rule of QP.

4.6. Interpretation of the Schrödinger equation

As an interpretation, we realize that the Schrödinger equation describes the most general propagation of a localized VP in nature, see Fig. 3. This includes the formation of orbits, such as in a hydrogen atom. These orbits represent the chemical elements in the periodic system of elements, see Mayer-Kuckuk (1980). The GSEQ and the SEQ hold also for masses, as these are formed from VPs via a phase transition, see Higgs (1964). Note that more generally, the algebraic structure of the wave equation of electromagnetic waves can be derived in the framework of the DEQ of VPs, when more general tensors are derived additionally, so that electromagnetic waves are included in a tensor version of the present framework, see Carmesin (2024a).

5. Derivation of the postulate about states

The first quantum postulate in Kumar (2018, p 168-170) is as follows: ‘The state of a quantum mechanical system, at a given instant of time, is described by a vector $|\psi(\tau)\rangle$, in the abstract Hilbert space H of the system.’ This postulate is derived as follows: The states of a quantum mechanical system are the solutions of the Schrödinger equation, see section (4). As the SEQ is a linear DEQ, its solutions form a Hilbert space. With the scalar product in Eq. {15}, the solution space is a Hilbert space H . This implies the above first quantum postulate, q. e. d.

6. Derivation of the postulate about observables

The second quantum postulate in Kumar (2018, p 168-170) is as follows: ‘A measurable physical quantity A (called an observable or dynamical physical quantity), is represented by a linear and hermitian (or self-adjoint, see Sakurai 1994) operator \hat{A} acting in the Hilbert space of the state vectors.’ This postulate is derived as follows: In general, each measurable quantity is obtained by a measurement, and each measurement is applied to a state of the system. That state is a vector $\psi(\tau)$ in H , see section (5). As a consequence, the measurement represents a function f of $\psi(\tau)$,

$$\text{measurement}(\text{state}(\psi)) \doteq f(\psi). \quad \{25\}$$

In general, a state vector $\psi(\tau)$ in H is a linear superposition $\psi(\tau) = \psi_1(\tau) + \psi_2(\tau)$. The above postulate states that the measurement should not cause

any nonlinear effects, as these would decrease the quality of the measurement. Accordingly, the above postulates require an ideal completely linear measurement. Therefore, an ideal and postulated measurement is linear,

$$f(\psi) = f(\psi_1 + \psi_2) = f(\psi_1) + f(\psi_2). \quad \{26\}$$

Consequently, the function represents a linear operator \hat{A} . Moreover, the observables have real values, so the operators are self-adjoint,

$$\text{measurement}(\text{state}(\psi)) \triangleq \hat{A} \psi. \quad \{27\}$$

Altogether, we realized that the postulate requires ideal linear measurement devices. And in that framework, we derived the postulate, q. e. d.

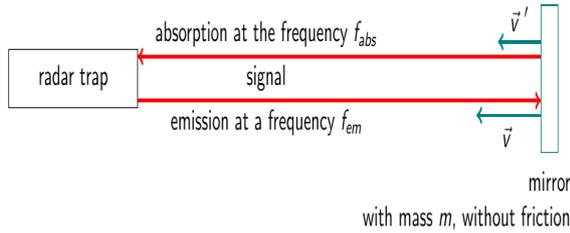


Fig. 4: A radar trap emits an electromagnetic signal to a car that drives with a velocity v . When the signal is reflected, energy and momentum are conserved, so that the velocity of the car reduces to a value v' . The car has a mass m and acts as a mirror, own figure.

7. Universal quantization

In this section, we show that the quantization constant is the same for all frequencies of electromagnetic signals. For it, we analyse a radar trap, see Fig. (4). The trap emits a signal with an energy E_{em} , frequency f_{em} and action $S_{em} = \frac{E_{em}}{f_{em}}$. The reflected signal with the respective values $S_{abs} = \frac{E_{abs}}{f_{abs}}$ is absorbed by the trap. The action of the signal is invariant in that process, $S_{em} = S_{abs}$. It has been shown in Carmesin (2023a, 2024a), that the action of a falling object is also invariant when a gravitational redshift occurs. The minimal action S_{min} is the Planck constant, and the value has to be measured.

7.1. Radar trap

At the radar trap, the frequency is increased by the Doppler effect as follows, see Burisch et al. (2025, p. 485) or Carmesin (2025), with $\beta = \frac{v}{c}$,

$$f_{abs} = f_{em} \cdot \frac{1+\beta}{1-\beta}. \quad \{28\}$$

When the signal is reflected at the car, energy and momentum are conserved. Hereby, the ratio u of the momentum p_{em} of the emitted signal and of the momentum $p_m = m \cdot v$ of the car is $u = \frac{p_{em}}{p_m}$. As a consequence, see Carmesin (2025), the energies of the emitted and of the absorbed signal are as follows,

$$E_{abs} = E_{em} \cdot \frac{1+\beta}{1-\beta-u\beta}. \quad \{29\}$$

The mass of the car is chosen large, so that the ratio u can be omitted. As a consequence, the ratio of the actions is one,

$$\frac{S_{abs}}{S_{em}} = \frac{E_{abs}}{f_{abs}} \cdot \frac{f_{em}}{E_{em}} = \frac{1+\beta}{1-\beta} \cdot \frac{1-\beta}{1+\beta} = 1. \quad \{30\}$$

Thus, the action is an invariant of the signal in this process. The minimal value S_{min} of this action is positive and represents to minimal invariant signal. Its value must be measured, it is the Planck constant, see Workman (2022).

8. Derivation of the postulate about eigenvalues

The third quantum postulate in Kumar (2018, p 168-170) is as follows: ‘The measurement of an observable A in a given state may be represented formally by the action of an operator \hat{A} on the state vector $\psi(\tau)$. The only possible outcome of such a measurement is one of the eigenvalues.’ This postulate is derived as follows: The first sentence of the postulate has already been derived in section (6). The second sentence is founded as follows. In general, a wave function ψ is a linear combination $\psi = \sum_j c_j \psi_j$ of eigenvectors ψ_j with eigenvalues a_j of the considered operator \hat{A} . The application of \hat{A} to ψ yields the following result

$$\hat{A}\psi = \sum_j c_j a_j \psi_j. \quad \{31\}$$

As a consequence, such an application of the operator changes the linear combination of the eigenvectors. But an ideal measurement should not remix the linear combination of the eigenvectors. An ideal measurement should leave the state unchanged, this is possible in the case of a single eigenvector,

$$\hat{A}\psi = \hat{A}\psi_j = a_j \psi_j, \quad \{32\}$$

or it should project to an eigenvector, this is possible in this case

$$\hat{A}\psi = \hat{A} \sum_j c_j \psi_j = a_j \psi_j. \quad \{33\}$$

In this sense, the third postulate again defines an ideal type of measurement and excludes conceivable other measurement devices. Of course, additionally, the postulate is in accordance with empirical findings.

9. Derivation of the postulate on probabilities

The fourth quantum postulate in Kumar (2018, p 168-170) is as follows: ‘If a measurement of an observable A is made in a state $\psi(\tau)$, of the quantum mechanical system, the following holds:

(1) The probability of obtaining one of the non-degenerate discrete eigenvalues a_j of the corresponding

operator \hat{A} is given by $P(a_j) = \frac{|\langle \phi_j | \psi \rangle|^2}{\langle \psi | \psi \rangle}$, where $|\phi_j\rangle$ is the eigenfunction of \hat{A} with the eigenvalue a_j . If the state vector is normalized to unity, $P(a_j) = |\langle \phi_j | \psi \rangle|^2$.

(2) If the eigenvalue a_j is m-fold degenerate, this

probability is given by $P(a_j) = \sum_{j=1}^m \frac{|\langle \phi_j | \psi \rangle|^2}{\langle \psi | \psi \rangle}$.

(3) If the operator \hat{A} possesses a continuous eigen-spectrum $\{a\}$, the probability that the result of a measurement will yield a value between a and $a + da$ is given by

$$P(a) = \frac{|\langle \phi(a) | \psi \rangle|^2}{\langle \psi | \psi \rangle} da = \frac{|\langle \phi(a) | \psi \rangle|^2}{\int |\phi(a')|^2 da'} da.$$

The postulate has been derived in Carmesin (2021a-d, 2022a-d, 2023a-d, 2024a-g, 2025). Here, we outline the proof of part (1). According to the central limit theorem, the relative frequency of a_j is proportional to the energy density $u_{kin} = \frac{\dot{\epsilon}_L^2}{8\pi G}$ of the state $\psi = t_n \cdot \dot{\epsilon}_L$. This result is insightful, as it shows how the physics of the VPs provides the probabilities that are essential for QP. This result has been derived in Carmesin (2018a-b, 2019, 2020, 2021a-d, 2022a-d, 2023a-d, 2024a-g, 2025). Moreover, this result shows that the probability density $p(L)$ of the state $\psi(L)$ is proportional to the energy density $u_{kin} = \frac{\dot{\epsilon}_L^2}{8\pi G}$. As a consequence, the probability density $p(L)$ of the state $\psi(L)$ is proportional to the absolute square of the wave function, $p(L) \propto |\psi|^2(L)$. This is a direct and empirically tested expression for the probabilistic outcomes of measurements. The result in part (1) can be derived with help of a transformation of these results: We use the bracket notation and orthonormal eigenfunctions $|\phi_j\rangle$. We represent the state $|\psi\rangle$ as a linear superposition of eigenfunctions

$$|\psi\rangle = \sum_j |\phi_j\rangle \langle \phi_j | \psi \rangle = \sum_j |\psi_j\rangle. \quad \{34\}$$

The factor $\sum_j |\phi_j\rangle \langle \phi_j |$ is identified with the identity matrix $\hat{1}$, as it keeps $|\psi\rangle$ identical,

$$\hat{1} = \sum_j |\phi_j\rangle \langle \phi_j|. \quad \{35\}$$

As shown above, the probability $P(a_j)$ of the state $|\psi\rangle$ is proportional to the respective energy density u_{kin} , which is proportional to the square $\langle \psi_j | \psi_j \rangle$. That proportionality is an equality, as the sum $\sum_j P(a_j)$ is one,

$$P(a_j) = \langle \psi_j | \psi_j \rangle. \quad \{36\}$$

Thereby, $\sum_j P(a_j) = 1$ is derived as follows: Eq. {34} implies

$$\langle \psi_j | \psi_j \rangle = \langle \psi | \phi_j \rangle \langle \phi_j | \phi_j \rangle \langle \phi_j | \psi \rangle = |\langle \psi | \phi_j \rangle|^2. \quad \{37\}$$

Hereby, we used $\langle \phi_j | \phi_j \rangle = 1$. The sum is

$$\sum_j \langle \psi_j | \psi_j \rangle = \langle \psi | \phi_j \rangle \langle \phi_j | \psi \rangle. \quad \{38\}$$

The identity matrix provides

$$\sum_j \langle \psi_j | \psi_j \rangle = \sum_j \langle \psi | \hat{1} | \psi \rangle = 1. \quad \{39\}$$

We apply Eq. {37} to Eq. {36},

$$P(a_j) = \langle \psi_j | \psi_j \rangle = |\langle \psi | \phi_j \rangle|^2. \quad \{40\}$$

This shows part (1) for the case of normalized functions considered here. q. e. d. The other cases are derived analogously.

10. Proposed learning process

In this section, I present a learning process that I used in two learning groups. I utilized the concept in a research club with students in classes ranging from 8 to 13. Moreover, I used the learning process in general studies courses at the university. In both cases, the results are documented, for instance with photos of the blackboard and with slides of a presentation. In both cases, exercises and discussions are applied.

- (1) As a preliminary step, Newton's mechanics and gravity is summarized, see Carmesin et al. (2018c). This takes about 90 min.
- (2) In a second preliminary step, basics of special relativity is summarized, see Burisch et al. (2025). This takes about 90 min.
- (3) In a preliminary step three, basics of general relativity are summarized, see Burisch et al. (2025). This takes about 90 min.
- (4) As first main step, the space paradox is derived. This takes about 45 min.
- (5) In a second main step, the concepts of additional volume and relative additional volume are introduced. This takes about 45 min.
- (6) At a third main step, the volume dynamics is derived. This takes about 45 min.
- (7) In a fourth preliminary step, basics of quantum physics are summarized, see Carmesin et al. (2020). This takes about 90 min.
- (8) As a fourth main step, the Schrödinger equation is derived from the VD and utilized. This takes about 90 min.
- (9) At a next main step, the postulate about states is derived and used. This takes about 45 min.
- (10) In a main step six, the postulate about observables is derived and used. This takes about 45 min.
- (11) In a next main step, the postulate about eigenvalues is derived and used. This takes about 45 min.
- (12) As a main step eight, universal quantization is derived and discussed. This takes about 45 min.
- (13) In a next main step, gravity, curvature and the energy density of gravitational fields are derived, applied and discussed. This is an essential preparation for the derivation of probabilistic outcomes. This takes about 135 min.

(14) In a completing main step, the postulate about probabilistic outcomes is derived, discussed and utilized. This takes about 135 min.

Altogether, the course provides a founded understanding of quantum physics and its connection to gravity and space physics. Preliminary introductions require 360 min (1-3,7). The derivation of volume dynamics needs 135 min (4-6). The Schrödinger equation is treated in 90 minutes (8). The three postulates about the algebraic structure of QP are derived and used in 135 min (9-11). Universal quantization is special, as it shows that an object exhibits a universal invariant positive action, and its minimal value provides quantization - of course the value of the minimal action must be measured, this topic takes 45 min (12). The derivation of gravity and curvature from the VD needs 135 min (13). This prepares the derivation of the postulate about probabilistic outcomes. The derivation and application of that postulate takes 135 min (14). In summary, the course needs 360 min preparation, 270 min for the VD and the implication of gravity and energy density, and 405 min for the derivation of the postulates and universal quantization. The needed 1035 min correspond to 23 lectures of 45 min each.

11. Experience from teaching

All students chose the course on a voluntary basis. Correspondingly, they were highly motivated. The students received a script, so they could concentrate on the lecture, discussion and exercises. For comparison, in a usual curricular course about quantum physics, experiments are used regularly. This course focuses on theoretical concepts. In general, experimental and theoretical courses have complementary purposes and are not intended to replace each other. In this course, the large introductory part has the purpose to enable everybody to participate in all coming exercises and derivations. In fact, everybody was able to do the exercises and to contribute to the discussions. Moreover, many students participated in small research projects and won prizes in the Jugend forscht competition. Altogether, it turned out that the large introductory part with 360 min has an intermediate learning barrier. This is optimal for a high participation in the learning process. An essential part is the cognitive conflict inherent to the space paradox. This provided a high motivation, as expected, see Kircher (2001). Students argued, that this provides an awareness of the problem and of the novelty of the solution. Thereby, the derivation of the paradox and of the solution have no technical complication. As a consequence, this part has an intermediate learning barrier. Based on the cognitive conflict, the additional volume was introduced. Hereby, the analogy to the mountains was helpful. Also in this part, the learning barrier has an optimal intermediate level. In the discussion, the students realized that the additional volume includes the volume portions that provide the solution of the space paradox. As a consequence, the additional

volume should be essential in order to overcome the incompatibility between GR and QP. Indeed, the volume dynamics provides the Schrödinger equation in a very direct manner. This confirms the expectation that the VPs should overcome the incompatibility between GR and QP. For more details see e. g. Carmesin (2024a, 2025). In discussions, the students realize that the Schrödinger equation can be fundamentally understood with help of the VPs: The Schrödinger equation and the VD provide the most general propagation of volume portions. In addition, the wave function describes the time derivative of the relative additional volume of such a volume portion. In this manner, the VD and the Schrödinger equation clarify open questions of the present-day QP. Also in this part, the learning barrier has an optimal intermediate level. Moreover, many essential solutions of the DEQ of VPs and of the Schrödinger equation can be obtained with help of an Ansatz and verified by inserting. The postulates 1-3 about the algebraic structure of quantum physics have been introduced with help of several examples. The students liked that procedure, as they were able to derive many instructive solutions on their own. Hereby, the learning barrier has an optimal intermediate level, as linear algebra is relatively intuitive and can be supplemented by many geometric examples. Some students liked that part especially, as they were able to discover connections on their own.

The derivation of the exact gravity and of the energy density of the exact gravitational field was based on instructions. The students were able to solve exercises and discuss the field. Thereby, they realized the unifying power of the VD, as it provides quantum physics and gravity and curvature in an indivisible manner. This was confirmed when the energy density of the exact field turned out to provide the probabilistic outcomes and the probabilities in quantum physics. With it, the students derived the postulate about probabilistic outcomes on their own, for the case of an example. The general derivation was presented in the lecture and in the script. Also this topic has an optimal intermediate learning barrier, when examples are used in order to discover results. Altogether, the course showed how the exact, direct and general unification is motivated by the space paradox, and how the students can derive many results on their own, as the unification is very natural, intuitive and problem solving. In summary, the concept has been tested in several learning groups. The concept can be directly utilized, as it is highly elaborated. Additionally, the concept can be used in a seminar, as my students use the concept in order to do projects on their own.

12. Discussion

The space paradox clearly shows that the concept of a single space provides a contradiction. The solution shows that space consists of many volume portions. These should overcome the incompatibility of GR and QP, that Einstein et al. (1935) realized. Indeed, these VPs have a very general dynamics. This

dynamics implies the Schrödinger equation and the quantum postulates. Additionally, the fact is derived that each signal or falling object has an invariant positive action S , which represents the invariant property of the object. The minimal value of S is universal, whereby the value of that minimal action, the Planck constant, must be measured. Moreover, the dynamics of the VPs provides exact gravity, curvature, the formation of space since the Big Bang, exact space navigation, exact adequate frames, and several solutions to fundamental problems of physics, see Carmesin (2017, 2018a-b, 2019, 2020, 2021a-d, 2022a-d, 2023a-d, 2024a-g, 2025). This shows the great unifying power of the concept. The space paradox is an ideal path to this unifying, problem solving, enlightening and fascinating field of physics. The students realize many of these advantages and express these in the discussions. The intensive use of previous knowledge provides a high learning efficiency, see Hattie (2009).

13. Literatur

- Ashby, N. and Patla, B. R. (2024) A relativistic framework to estimate clock rates on the moon. *The Astronomical Journal*, 168, p. 14.
- Bohr, Nils (1920). Über die Serienspektren der Elemente. *Z. f. Physik*, 2(5), p. 423-469.
- Brisch, C. et al. (2025). *Universum Physik Gesamtband SII, Ausgabe B*. Berlin: Cornelsen Verlag.
- Carmesin, Hans-Otto (2017). *Vom Big Bang bis heute mit Gravitation: Model for the Dynamics of Space*. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Carmesin, Hans-Otto (2018a). *Entstehung dunkler Energie durch Quantengravitation - Universal Model for the Dynamics of Space, Dark Matter and Dark Energy*. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Carmesin, Hans-Otto (2018b). *Entstehung der Raumzeit durch Quantengravitation - Theory for the Emergence of Space, Dark Matter, Dark Energy and Space-Time*. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Carmesin, Hans-Otto et al. (2018c): *Universum Physik, Einführungsphase, Nordrhein-Westfalen*. Berlin: Cornelsen Verlag.
- Carmesin, Hans-Otto (2019). *Die Grundschwingungen des Universums - The Cosmic Unification - With 8 Fundamental Solutions based on G, c and h*. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Carmesin, Hans-Otto (2020). *The Universe Developing from Zero-Point Energy: Discovered by Making Photos, Experiments and Calculations*. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Carmesin, Hans-Otto et al. (2020): *Universum Physik, Qualifikationsphase, Niedersachsen*. Berlin: Cornelsen Verlag.
- Carmesin, Hans-Otto (2021a). *Quanta of Spacetime Explain Observations, Dark Energy, Graviton and Nonlocality*. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Carmesin, Hans-Otto (2021b). *Cosmological and Elementary Particles Explained by Quantum Gravity*. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Carmesin, Hans-Otto (2021c). *The Elementary Charge Explained by Quantum Gravity*. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Carmesin, Hans-Otto (2021d). *Lernende erkunden die Raumzeit*. *Der Mathematikunterricht*. 67(2), 47-56.
- Carmesin, Hans-Otto (2022a). *Quantum Physics Explained by Gravity and Relativity*. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Carmesin, Hans-Otto (2022b). *Explanation of Quantum Physics by Gravity and Relativity*. *PhyDid B*, pp 425-438.
- Carmesin, Hans-Otto (2022c). *How Excitations of Vacuum Form Matter*. *PhyDid B*, pp 447-458.
- Carmesin, Hans-Otto (2022d). *The Electroweak Interaction Explained by and Derived from Gravity and Relativity*. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Carmesin, Hans-Otto (2023a). *Geometric and Exact Unification of Spacetime, Gravity and Quanta*. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Carmesin, Hans-Otto (2023b). *{Students Exactly Derive Quantization and its Universality*. *PhyDid B*.
- Carmesin, Hans-Otto (2024a). *How Volume Portions Form and Found Light, Gravity and Quanta*. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Carmesin, Hans-Otto (2024b). *Students Learn the Fundamental Exact Unification of Gravity, Relativity, Quanta and Elementary Charge*. *PhyDid B*.
- Carmesin, Hans-Otto (2024c). *Students Learn to Derive Universal Properties of Gravitons*. *PhyDid B*.
- Carmesin, Hans-Otto (2024d). *Students Learn to Derive the Energy Density of Volume*. *PhyDid B*.
- Carmesin, Hans-Otto (2024e). *Students Analyse the Impact of the H_0 Tension on the Worldview*. *PhyDid B*.
- Carmesin, Hans-Otto (2024f). *Students Learn to Derive Nonlocality from Fundamental Physics*. *PhyDid B*.
- Carmesin, Hans-Otto (2024g). *Students Learn to Solve the Cosmological Constant Problem*. *PhyDid B*.
- Carmesin, Hans-Otto (2025). *On the Dynamics of Time, Space and Quanta – Essential Results for Space Flight and Navigation*. Berlin: Verlag Dr. Köster.
- Einstein, Albert (1905). *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*. *Annalen der Physik*, 17, pp 891-921.
- Einstein, Albert (1915). *Die Feldgleichungen der Gravitation*. *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften*, pp 844-847.

- Einstein, Albert (1917). Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie. Sitzungsberichte der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften, pp 142-152.
- Einstein, Albert, Podolski, Boris, Rosen, Nathan (1935). Can the quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? *Phys. Rev.*, 47, pp 777-780.
- Hattie, John (2009). *Visible Learning*. London: Taylor and Francis Ltd.
- Heisenberg, Werner (1925). Quantum-Theoretical Re-Interpretation of Kinematic and Mechanical Relations. *Z. f. Physik*, 33, p. 879-893.
- Higgs, P. W. (1964). Broken Symmetries, Massless Particles and Gauge Fields. *Phys. Lett.*, pp 132-133.
- Hilbert, David et al. (1928) Über die Grundlagen der Quantenmechanik. *Mathematisch Annalen*, pp. 395-407.
- Hobson, M. P. and Efstathiou, G. P. and Lasenby, A. N. (2006). *General Relativity*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Huterer, Dragan and Turner, Michael, S. (1999). Prospects for probing the dark energy via supernova distance measurements. *Phys. Rev. D*, 60, pp 081301-081306.
- Kircher, Ernst and Girwidz, Raimund and Häußler, Peter (2001) *Physikdidaktik*. 2. Ed. Berlin: Springer.
- Kumar, A. (2018). *Fundamentals of Quantum Mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Mayer-Kuckuk, T. (1980) *Atomphysik*. Stuttgart: Teubner.
- Muckenfuß, Heinz (1995). *Lernen im sinnstiftenden Kontext*. Berlin: Cornelsen
- Niiniluoto, Ilkka and Sintonen, Matti and Wolenski, Jan (2004) *Handbook of Epistemology*. Dordrecht: Springer.
- Perlmutter, Saul et al. (1998) Discovery of a Supernova Explosion at Half the Age of the Universe. *Nature*, 391, pp 51-54.
- Planck-Collaboration (2020) Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters. *Astronomy & Astrophysics*, pp 1-73.
- Popper, Karl (1935). *Logik der Forschung*, Wien: Julius Springer Verlag.
- Popper, Karl (2002). *The Logic of Scientific Discovery*, London: Routledge.
- Riess, Adam et al. (2020). Tests of the Accelerating Universe with Near-Infrared Observations of a High-Redshift Type Ia Supernova. *The Astrophysical Journal*, 536, pp. 62-67.
- Sakurai, J. J. and Napolitano, Jim (1994) *Modern Quantum Mechanics*. New York – London - Delhi: Addison-Wesley.
- Schrödinger, E. (1926). Quantisierung als Eigenwertproblem I. *Annalen der Physik*, 79, pp 361-376.
- Schwarzschild, K. (1916). Über das Gravitationsfeld eines Massenpunktes nach der Einstein'schen Theorie. *Sitzungsberichte der Deutschen Akademie der Wissenschaften*, pp 186-196.
- Smoot, George F. (2007) Nobel Lecture: Cosmic microwave background radiation anisotropies: Their discovery and utilization. *Review of Modern Physics*, 79, pp 1347-1379.
- Soffel, et al. (2003): The IAU 2000 Resolutions for Astrometry, Celestial Mechanics, and Metrology in the relativistic Framework: Explanatory Supplement. *The Astronomical Journal*, 126, pp. 2678-2706.
- Workman, R. L. et al. (2022) Review of Particle Physics (by Particle Data Group). *Prog. Theor. Exp. Phys.*, pp 1-2270.

Acknowledgement

I thank I. Carmesin for interesting discussions and proofreading the manuscript. I thank Matthias Carmesin for stimulating discussions.

Didaktische Rekonstruktion zur Quantenbildung

- Interferenzkontrast im Experiment quantitativ charakterisieren -

Dustin-Philipp Preissler*, Holger Cartarius*

*AG Fachdidaktik der Physik und Astronomie, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Max-Wien-Platz 1, 07743
Jena
dustin.philipp.preissler@uni-jena.de

Kurzfassung

Ein wesentliches Merkmal von Quantenobjekten ist die Fähigkeit zur Interferenz. In einem Mach-Zehnder-Interferometer beobachtet man Interferenz von Laserstrahlen oder auch Einzelphotonen. Für Laserstrahlung lässt sich dieses Phänomen klassisch sehr anschaulich mithilfe der Überlagerung zweier elektromagnetischer Wellen erklären, die auf zwei unterschiedlichen Wegen durch das Interferometer propagieren. Entscheidend für die quantenphysikalische Erklärung ist, dass für ein Einzelphoton, das zum Interferenzmuster beiträgt, keine Information über den tatsächlich genommenen Weg durch das Interferometer vorliegt. Liegt stattdessen Welche-Weg-Information vor, trägt das Einzelphoton nicht zum Interferenzmuster bei. Klassisch kann man dazu einen der beiden Strahlengänge im Interferometer blockieren: Das Interferenzmuster verschwindet. Wir gehen hier der Frage nach, was mit dem Interferenzmuster passiert, wenn ein Strahlengang etwas geschwächt wird, z.B. durch ein Objekt mit Transmissionskoeffizient T und wie sich die Sichtbarkeit der Interferenz (= Interferenzkontrast) im Experiment sogar quantifizieren lässt. Der Interferenzkontrast charakterisiert unter anderem die Performanz von Experimenten zur Quantenbildung und die Transmission des Objekts. Somit beleuchtet dieser Artikel auch einen wichtigen Teilaspekt moderner Quantentechnologien und bereitet ihn für Lehramtsstudierende und außerschulische Lernorte auf.

Weiterhin wird das Mach-Zehnder-Interferometer mit einem Objekt im Strahlengang ausführlich mathematisch beschrieben, da Lehramtsstudierende der Physik nicht nur den Dirac-Formalismus im Rahmen der zweiten Quantisierung auf ein schultaugliches Real-Experiment anwenden können, sondern auch Interferenz sprachlich sauber charakterisieren lernen.

1. Mathematische Grundlagen

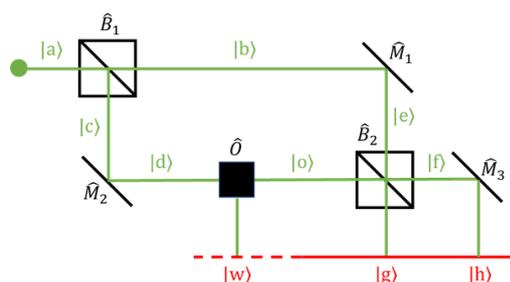


Abb. 1: Mach-Zehnder-Interferometer mit eingebrachtem Objekt \hat{O} im unteren Strahlengang. Jeder Strahlengang wird durch einen Ket-Vektor repräsentiert, jede optische Komponente durch einen Operator (Strahlteiler \hat{B} , Spiegel \hat{M} , Objekt \hat{O}). Vor der Detektion ist der Zustand eine Superposition aus Detektion auf einem Schirm in $|g\rangle$ oder $|h\rangle$ und Absorption $|w\rangle$ durch das Objekt. Eigene Abbildung

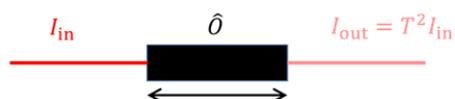


Abb. 2: Laserstrahlung wird durch ein Objekt mit Transmissionskoeffizient T in seiner Intensität I geschwächt. Eigene Abbildung

Das Mach-Zehnder-Interferometer (Abb. 1) besteht aus einer Laserquelle, die Photonen in den Strahlengang $|a\rangle$ aussendet. Am ersten 50:50-Strahlteiler \hat{B}_1 wird dieser Strahl in $|b\rangle$ und $|c\rangle$ aufgeteilt. Spiegel \hat{M}_1 reflektiert den oberen Strahl und Spiegel \hat{M}_2 den unteren Strahl. Beide Strahlen treffen auf einen weiteren 50:50-Strahlteiler \hat{B}_2 mit Ausgängen $|f\rangle$ und $|g\rangle$. Zur Detektion beider Ausgänge mit nur einem Schirm wird ein zusätzlicher Spiegel \hat{M}_3 genutzt. In den unteren Strahlengang wird ein Objekt \hat{O} mit Transmissionskoeffizient T eingebracht [1]. Dieser hängt direkt mit der Transmissionswahrscheinlichkeit T^2 eines Einzelphotons durch das Objekt zusammen. Die Wahrscheinlichkeit für Absorption (= Gegenereignis zu Transmission) beträgt entsprechend $1 - T^2$. Makroskopisch ergibt sich für Laserstrahlung der in Abb. 2 dargestellte Zusammenhang [2]. Die Absorption können wir ganz einfach durch einen Verlust-Strahlengang $|w\rangle$ modellieren: Ein Photon, das absorbiert wurde, wird nicht in einem der Strahlengänge $|a\rangle$ bis $|h\rangle$ zu finden sein [3].

Ein Photon, das durch das Objekt transmittiert, kann eine Phasenverschiebung erleiden, weil z.B. das Objekt aus Glas besteht und die Ausbreitungsgeschwin-

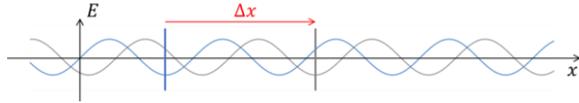


Abb. 3: Zwei Sinusfunktionen mit derselben Amplitude, die um Δx verschoben sind. Beispielhaft ist hier der räumliche Verlauf der elektrischen Feldstärke einer elektromagnetischen Welle dargestellt ($t = \text{const.}$). Eigene Abbildung

digkeit c im Vergleich zur Lichtgeschwindigkeit c_0 in Vakuum bzw. Luft verringert ist. Dadurch ist der Brechungsindex charakterisiert: $n = c_0/c$. Man kann sich nun leicht makroskopisch mithilfe elektromagnetischer Wellen überlegen, welche Zusammenhänge hinter dem Strahlteiler \hat{B}_2 , also nach dem Zusammenführen der zuvor getrennten Teilwellen, zwischen diesen zwei phasenverschobenen Wellenzügen bestehen (Abb. 3):

Oberer Wellenzug in Abb. 1 (blauer Graph):

$$E_0 \sin(kx), \quad \{1\}$$

unterer Wellenzug in Abb. 1 (grauer Graph):

$$E_0 \sin[k(x - \Delta x)]. \quad \{2\}$$

Dabei ist $k = 2\pi/\lambda$ die Wellenzahl mit der Wellenlänge λ . Der untere Wellenzug ist um Δx nach rechts verschoben. Um welchen Winkel (bzw. Phase) ϕ muss der untere Wellenzug verschoben werden, damit er wieder in Phase mit dem oberen Wellenzug ist? In Formeln:

$$\sin(kx) = \sin[k(x - \Delta x) + \phi]. \quad \{3\}$$

Offensichtlich ist das allgemein für $m2\pi = -k\Delta x + \phi$ mit $m \in \mathbb{Z}$ erfüllt. Insgesamt ergibt sich also (o.B.d.A. $m = 0$):

$$\phi = k\Delta x = \frac{2\pi\Delta x}{\lambda} = \frac{2\pi f\Delta x}{c} = \frac{2\pi f n \Delta x}{c_0}. \quad \{4\}$$

Dabei ist $c = \lambda f$ mit der Frequenz f des Lasers bzw. der Einzelphotonen. Diese Formel beinhaltet – wie wir noch sehen werden – alle Möglichkeiten, die Struktur des Interferenzmusters zu beeinflussen [4].

Mithilfe des Dirac-Formalismus können wir jede Beeinflussung von Einzelphotonen bzw. von Laserstrahlung im Rahmen der zweiten Quantisierung beschreiben. Der einfallende Strahl wird mit $|\text{ein}\rangle$ bezeichnet, die übrigen Bezeichnungen der Ket-Vektoren sind sehr intuitiv [3]-[5]:

Phasenverschiebung ϕ :

$$|\text{ein}\rangle \mapsto \exp(i\phi) |\text{aus}\rangle, \quad \{5\}$$

Transmission/Absorption:

$$|\text{ein}\rangle \mapsto T |\text{transmittiert}\rangle + \sqrt{1 - T^2} |\text{absorbiert}\rangle. \quad \{6\}$$

Jetzt können wir die Bauteile im Interferometer modellieren [1]:

$$\text{Spiegel } \hat{M}: |\text{ein}\rangle \mapsto i |\text{reflektiert}\rangle, \quad \{7\}$$

$$\text{Strahlteiler } \hat{B}: |\text{ein}\rangle \mapsto 1/\sqrt{2} (|\text{transmittiert}\rangle + i |\text{reflektiert}\rangle), \quad \{8\}$$

$$\text{Objekt } \hat{O}: |\text{ein}\rangle \mapsto T \exp(i\phi) |\text{transmittiert}\rangle + \sqrt{1 - T^2} |\text{absorbiert}\rangle. \quad \{9\}$$

Man kann sich schnell davon überzeugen, dass die Vektoren, auf welche die Zustände $|\text{ein}\rangle$ abgebildet werden, ebenfalls Zustände sind. Diese Formeln fassen mathematisch alles kompakt zusammen. Sie enthalten bspw. die Information, dass zwischen einfallendem und reflektiertem Strahl an einer Grenzfläche (z.B. Spiegelfläche oder Strahlteiler) eine Phasendifferenz von $\pi/2$ besteht, denn $i = \exp(i\pi/2)$.

Vor der Messung eines Einzelphotons mithilfe eines Schirms oder Detektors können wir nicht sagen, ob es absorbiert wurde ($|\text{w}\rangle$) oder in $|\text{g}\rangle$ oder $|\text{h}\rangle$ zu finden sein wird. Wir erwarten also eine Superposition aus $|\text{g}\rangle$, $|\text{h}\rangle$ und $|\text{w}\rangle$ für unseren Zustand vor der Messung, den wir mit $|\psi\rangle$ bezeichnen. Wir wenden jetzt einfach obige Formeln Schritt für Schritt auf unsere Laserstrahlung bzw. Einzelphotonen im Interferometer an, nachdem diese auf ein bestimmtes Bauteil getroffen ist bzw. sind:

$$\hat{B}_1: |\text{a}\rangle \mapsto \frac{1}{\sqrt{2}} (|\text{b}\rangle + i|\text{c}\rangle), \quad \{10\}$$

$$\hat{M}_1: |\text{b}\rangle \mapsto i|\text{e}\rangle, \quad \{11\}$$

$$\hat{M}_2: |\text{c}\rangle \mapsto i|\text{d}\rangle, \quad \{12\}$$

$$\hat{O}: |\text{d}\rangle \mapsto T \exp(i\phi) |\text{o}\rangle + \sqrt{1 - T^2} |\text{w}\rangle, \quad \{13\}$$

$$\hat{B}_2: |\text{o}\rangle \mapsto \frac{1}{\sqrt{2}} (|\text{f}\rangle + i|\text{g}\rangle)$$

$$\& |\text{e}\rangle \mapsto \frac{1}{\sqrt{2}} (|\text{g}\rangle + i|\text{f}\rangle), \quad \{14\}$$

$$\hat{M}_3: |\text{f}\rangle \mapsto i|\text{h}\rangle. \quad \{15\}$$

Jetzt kann man alles ineinander einsetzen, um zu erhalten:

$$\begin{aligned} |\text{a}\rangle \mapsto |\psi\rangle := & \frac{i}{2} (|\text{g}\rangle - |\text{h}\rangle) \\ & - \frac{i}{2} T \exp(i\phi) (|\text{g}\rangle + |\text{h}\rangle) \\ & - \frac{\sqrt{1 - T^2}}{\sqrt{2}} |\text{w}\rangle. \end{aligned} \quad \{16\}$$

Das ist genau das, was wir erwartet haben: Eine Superposition aus den Zuständen $|\text{g}\rangle$, $|\text{h}\rangle$ und $|\text{w}\rangle$. Die Herleitung der Formel des Zustandes $|\psi\rangle$ ist auch als Übung geeignet, genauso wie die weiteren Betrachtungen: Mithilfe der Bornschen Regel können wir die Wahrscheinlichkeiten für Detektion in Strahlengang $|\text{g}\rangle$, $|\text{h}\rangle$ oder $|\text{w}\rangle$ (Absorption) ausrechnen [1]:

$$P_g = |\langle \text{g} | \psi \rangle|^2 = \frac{1}{4} [T^2 - 2T \cos \phi + 1], \quad \{17\}$$

$$P_h = |\langle \text{h} | \psi \rangle|^2 = \frac{1}{4} [T^2 + 2T \cos \phi + 1], \quad \{18\}$$

$$P_w = |\langle \text{w} | \psi \rangle|^2 = \frac{1 - T^2}{2}. \quad \{19\}$$

Tab. 1: Detektionswahrscheinlichkeiten für Einzelphotonen im Mach-Zehnder-Interferometer bei Abwesenheit des Objektes ($T = 1$) und Strahlfalle als Objekt ($T = 0$)

	$T = 1$	$T = 0$
P_g	$\sin^2(\phi/2)$	$1/4$
P_h	$\cos^2(\phi/2)$	$1/4$
P_w	0	$1/2$

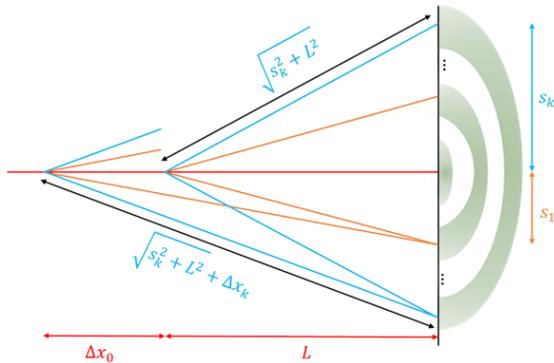


Abb. 4: Optische Achse des Mach-Zehnder-Interferometers in rot. Durch den oberen Strahlengang legt das Licht den optischen Weg L zurück, im unteren Strahlengang den Weg $L + \Delta x_0$. Entfernt man sich entlang des Schirms von der optischen Achse, nehmen die optischen Weglängendifferenzen ab. Gilt z.B. $\Delta x_0 = m\lambda$ mit $m \in \mathbb{N}$, so ist $\Delta x_k = (m - k)\lambda$ mit $k \leq m$. Für ein auf identische optische Weglängen in beiden Teilwellen justiertes Interferometer ($m = 0$) gibt es deshalb keine Nebenmaxima. Eigene Abbildung nach [6]

Der Spezialfall $T = 1$ liefert uns die bekannten Formeln für das ungestörte Mach-Zehnder-Interferometer (keine Welcher-Weg-Information) und $T = 0$ entspricht dem Vorhandensein vollständiger Welcher-Weg-Information (Tab. 1) [4].

Für den Fall $T = 1$ erhalten wir ein Interferenzmuster auf dem Schirm, da P_g und P_h von ϕ abhängen. Schauen wir uns dazu Gl. {4} nochmal an: Für ein ungestörtes Interferometer ($n = \text{const.}$) bei Verwendung eines monochromatischen Lasers ($f = \text{const.}$) hängt ϕ nur von einer Weglängendifferenz Δx ab. Jeder Punkt des Schirms steht für ein anderes Δx (Abb. 4). Auf der optischen Achse gilt, weil man gerade im Schulkontext kein perfekt auf identische optische Weglängen in beiden Armen justiertes Interferometer realisiert bekommt, $\Delta x = \Delta x_0$, und mit größer werden dem Abstand von der optischen Achse fällt Δx monoton. Weil \sin^2 und \cos^2 periodische Funktionen sind, gibt es periodisch helle und dunkle Stellen auf dem Schirm und weil der Laserstrahl rotationssymmetrisch ist, ergibt sich ein rotationssymmetrisches Interferenzbild aus hellen und dunklen Kreisen [6]. Insgesamt ist dem Interferenzbild noch das Laserprofil aufgeprägt, die Intensität nimmt also radial exponentiell ab (Abb. 5 links).

Für den Fall $T = 0$ hat die Detektionswahrscheinlichkeit keinen Freiheitsgrad. Hier ist der Schirm

konstant beleuchtet, wobei auch hier wieder das Intensitätsprofil radial exponentiell abnimmt (Abb. 5 rechts).

Insbesondere werden in der Schule oder in Lehrveranstaltungen an der Universität diese beiden Spezialfälle behandelt. Der Spezialfall $T = 1$ wird meist als Interferenz bezeichnet, weil die Detektionswahrscheinlichkeiten von der Phasenverschiebung ϕ abhängen. Für ein perfekt justiertes Interferometer gilt z.B. $\phi = 0$ und $P_g = 0$ und $P_h = 1$. Einzelphotonen werden also nur im Ausgang $|h\rangle$ gemessen.

Tatsächlich sollte man aber für den Fall $T = 1$ nicht nur von *Interferenz* reden, sondern von *Interferenz mit maximalem Interferenzkontrast*, wie wir noch sehen werden. Geradezu natürlich erwächst nämlich die Frage nach der Gestalt des Interferenzmusters für alle Fälle $0 < T < 1$. Wir schreiben dazu die Gln. {17}-{19} für die Detektionswahrscheinlichkeiten mit trigonometrischen Identitäten künstlich um:

$$P_g = T \sin^2 \frac{\phi}{2} + (1 - T)^2 \frac{1}{4}, \quad \{20\}$$

$$P_h = T \cos^2 \frac{\phi}{2} + (1 - T)^2 \frac{1}{4}, \quad \{21\}$$

$$P_w = T \cdot 0 + (1 - T)^2 \frac{1}{2}. \quad \{22\}$$

Man sieht sehr deutlich, dass für alle Fälle $0 < T < 1$ die Detektionswahrscheinlichkeiten eine Überlagerung aus den beiden Spezialfällen ($T = 1$ und $T = 0$) bilden. Mit abnehmendem T nimmt der Einfluss der Summanden ab, die von ϕ abhängen. Die Sichtbarkeit der Interferenz wird schlechter. Hätte insbesondere der zweite Summand (der nicht von ϕ abhängt) den Koeffizienten $1 - T$, dann würde die Sichtbarkeit der Interferenz linear mit T abnehmen. Das Auftauchen des Koeffizienten $(1 - T)^2$ legt aber ein nichtlineares Verhalten nahe.

2. Interferenzkontrast als physikalische Größe

Wir sehen an den Gln. {20}-{22}, dass im Falle eines Objekts mit Transmission $0 < T < 1$ das Interferenzbild eine Überlagerung aus Interferenz mit maximalem Kontrast und keiner Interferenz (konstante Beleuchtung) ist. Folglich werden mit abnehmendem T die Minima immer heller und die Maxima immer dunkler. Weil immer mehr Photonen absorbiert und gar nicht detektiert werden, wird das Interferenzbild im Mittel dunkler. Der Kontrast nimmt rapide ab.

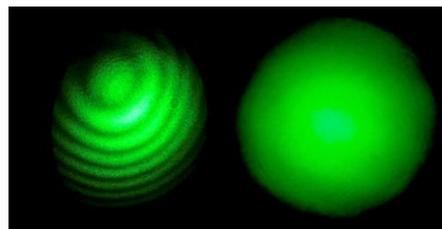


Abb. 5: Detektierte Laserstrahlung für den Fall Interferenz mit maximalem Interferenzkontrast ($T = 1$, links) und für den Fall eines blockierten unteren Strahlengangs ($T = 0$, rechts). Eigene Abbildung

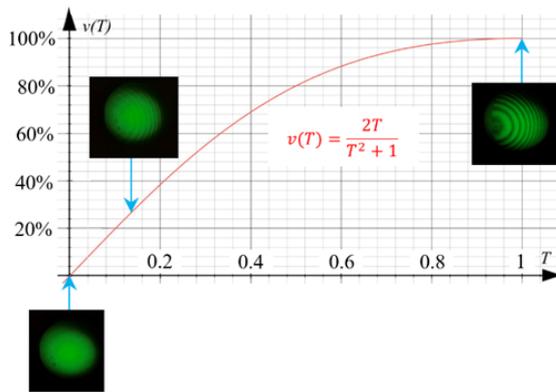


Abb. 6: Abhängigkeit des Interferenzkontrastes $v(T)$ im Mach-Zehnder-Interferometer vom Transmissionskoeffizienten T des eingebrachten Objekts. Die Interferenzbilder repräsentieren von links nach rechts: 0%, 27%, 100% Interferenzkontrast. Eigene Abbildung nach [1]

Um das zu quantifizieren, definiert man den Interferenzkontrast V wie folgt [2]:

$$\text{Interferenzkontrast} = \frac{\text{Amplitude}}{\text{Mittelwert}} \quad \{23\}$$

Die Amplitude ist gegeben durch $|I_g - I_h|/2$ und der Mittelwert durch $(I_g + I_h)/2$. Mit $I_g = I_a P_g$ und $I_h = I_a P_h$ folgt [7]:

$$V = \frac{|I_g - I_h|}{I_g + I_h} = \frac{2T}{T^2 + 1} |\cos \phi|. \quad \{24\}$$

Wir haben bereits diskutiert, dass jeder Punkt auf dem Schirm für ein anderes Δx bzw. ϕ steht. Global wird der Interferenzkontrast nur von T bestimmt. Wir definieren deshalb den Interferenzkontrast als [1]:

$$\frac{V}{|\cos \phi|} = \frac{2T}{T^2 + 1} =: v(T). \quad \{25\}$$

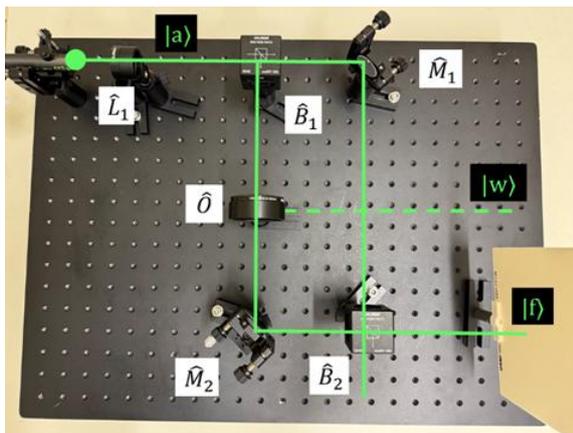


Abb. 7: Das Objekt \hat{O} ist ein ND-Filter bekannter Transmission. Das Objekt kann beliebig im unteren Strahlengang platziert werden. Die Zerstreuungslinse \hat{L}_1 weitet den Laserstrahl auf, um das Interferenzbild auf dem Schirm zu vergrößern. Es genügt für das Experiment zur Bestimmung des Interferenzkontrastes die Verwendung eines Schirms in $|f\rangle$ oder $|g\rangle$. Eigene Abbildung

Gemäß unserer Vorbetrachtung hängt der Interferenzkontrast nichtlinear von T ab. Abbildung 6 zeigt den grafischen Verlauf von $v(T)$. Er enthält unsere beiden Spezialfälle: $T = 1$ liefert einen Interferenzkontrast von $V = 1 = 100\%$ und $T = 0$ ergibt $V = 0 = 0\%$. Dazwischen liegen all unsere Fälle mit Interferenzkontrasten $0 < V < 1$. Wir ersetzen unser Objekt durch einen ND-Filter mit Transmission T^2 (Abb. 7). Mit Gl. {25} kann man aus dem Transmissionskoeffizienten den Interferenzkontrast bestimmen. Im Falle von 2% Transmission, d.h. $T^2 = 0.02$, ist $T \approx 0.14$ und $v(T) \approx 27\%$.

Im Experiment kann durch die Wahl verschiedener ND-Filter mit definierter Transmission mithilfe von Gl. {25} der Interferenzkontrast berechnet werden. So kann man sehr effizient verschiedene Interferenzbilder mit definiertem Kontrast einstellen.

3. Fazit

Das Mach-Zehnder-Interferometer wurde mithilfe der zweiten Quantisierung quantenmechanisch beschrieben. Im Experiment nutzen wir hingegen klassisches Licht. Das ist kein Widerspruch, da die Detektionswahrscheinlichkeiten mit relativen Intensitäten verknüpft werden. So muss das aus der Schule und aus den ersten Semestern bekannte Wellenmodell des Lichts nicht aufgegeben werden, da die neue quantenmechanische Beschreibung daran anknüpft. Jeder der in der Rechnung auftauchenden Größen kann eine reale Größe im Experiment zugeordnet werden. Das hilft bei der Charakterisierung von Interferenz als Wellen- und quantenmechanisches Phänomen. Insbesondere der Interferenzkontrast kann sehr leicht charakterisiert werden. Er ist notwendig, um bei modernen Quantentechnologien wie z.B. Quantenbildgebung die Performanz des Aufbaus zu bewerten. Ein abnehmender Interferenzkontrast kann z.B. ein Hinweis für im Aufbau auftretende Absorption sein. Das bedeutet konkret: Einzel-Photonen gehen verloren, weil sich Linsen oder Spiegel im Laufe der Zeit leicht verformen oder verkippen aufgrund von Temperaturschwankungen, Erschütterungen usw. [8] Umgekehrt sollte man beim Justieren nur solche Schritte vornehmen, die den Interferenzkontrast verbessern.

4. Literatur

- [1] Preissler, D.-P.; Mappes, T.; Dienerowitz, M.; Cartarius, H. (2025): Teaching the Foundations of Quantum Imaging Through Mach-Zehnder Interferometry. In: 2025 IEEE Conference on Education and Training in Optics and Photonics (ETOP). Glasgow: IEEE. Url: <https://doi.org/10.1109/ETOP64842.2025.11030714> (Stand 8/2025)
- [2] Fox, M. (2006): Quantum Optics. An Introduction. Oxford: Oxford University Press.

- [3] Lemos, G.B.; Borish, V.; Cole, G.D.; Ramelow, S.; Lapkiewicz, R.; Zeilinger, A. (2014): Quantum imaging with undetected photons. In: Nature 512 (7515), S. 409–412. Url: <https://doi.org/10.1038/nature13586> (Stand 5/2025)
- [4] Lvovsky, A.I. (2018): Quantum Physics. An Introduction Based on Photons. 1st ed. Berlin, Heidelberg: Springer.
- [5] Vedral, V. (2005): Modern Foundations of Quantum Optics. London: Imperial College Press.
- [6] Thorlabs Inc. (2018): EDU-QE1. EDU-QE1/M. Quantum Eraser Demonstration Kit. User Guide. Url: <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=EDU-QE1/M> (Stand 8/2025)
- [7] Aehle, S.; Scheiger, P.; Cartarius, H. (2022): An Approach to Quantum Physics Teaching through Analog Experiments. In: Physics 4 (4), S. 1241–1252. Url: <https://doi.org/10.3390/physics4040080> (Stand 5/2025)
- [8] Gilaberte Basset, M.; Hochrainer, A.; Töpfer, S.; Riexinger, F.; Bickert, P.; León-Torres, J. R. et al. (2021): Video-Rate Imaging with Undetected Photons. In: Laser & Photonics Reviews 15 (6), S. 2000327. Url: <https://doi.org/10.1002/lpor.202000327> (Stand 5/2025)

Danksagung

Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) – Projektnummer 398816777 – SFB 1375 „Nonlinear Optics down to Atomic scales“.

Entwicklung einer Versuchsanleitung zu Interferenz-Experimenten mit Einzel-Photonen im Rahmen eines Quantenoptik- Praktikums

Felipe Laumen*, Sebastian Nell*, Ralf Detemple*, Heidrun Heinke*

*I. Physikalisches Institut IA, RWTH Aachen University
Sommerfeldstraße 16, 52074 Aachen
felipe.laumen@rwth-aachen.de

Kurzfassung

Das vorgestellte Projekt beschäftigt sich mit der Entwicklung einer Versuchsanleitung, mit der Schülerinnen und Schüler der Oberstufe Einzel-Photonen-Interferenz und darauf aufbauend den Quantenradierer unter Verwendung eines Quantenoptik-Kits der Firma Thorlabs® im Rahmen eines Praktikums erkunden können. Der wiederholte Vergleich von klassischen und quantenmechanischen Beschreibungen macht auf Gemeinsamkeiten sowie Unterschiede aufmerksam und kann helfen, Schülervorstellungen zu überwinden. Dieser Beitrag beschreibt die experimentelle Umsetzung und Überlegungen, die bei der Entwicklung der Versuchsanleitung zu den Experimenten eingeflossen sind. Das eröffnet Einblicke in die laufende Entwicklungsarbeit eines Quantenoptik-Praktikums an der RWTH Aachen.

1. Motivation

Quantenphysik ist nicht nur in Nachrichten, Literatur und Unterhaltung inzwischen omnipräsent, sondern auch fester Bestandteil der Curricula im Physikunterricht. Phänomene wie Interferenz und Superposition von Quantenobjekten sind Teil der KMK-Bildungsstandards (vgl. KMK, 2020). Auch im Kernlehrplan des Landes NRW finden quantenmechanische Eigenschaften von Photonen ebenso Erwähnung, wie „Welcher-Weg“-Informationen zur Begründung von Interferenzphänomenen (vgl. Ministerium für Schule und Bildung NRW, 2022).

Von Lehrenden wird der Unterricht zu Experimenten aus diesem Themenbereich wie beispielsweise der Quantenradierer aber als herausfordernd empfunden (vgl. Weber et al., 2020). Auch ist das Equipment verglichen mit Aufbauten für klassische Experimente hochpreisig (vgl. Thorlabs, 2024, Leybold 2025). Ein Praktikum für SuS¹ soll die Möglichkeit eröffnen, mithilfe von auf die Zielgruppe angepassten Materialien die Interferenz von Einzelphotonen und darauf aufbauend den Quantenradierer experimentell zu beobachten und einen Zugang zu den physikalischen Inhalten zu finden.

2. Umsetzung

In der experimentellen Umsetzung wurde auf die Detektion durch die Koinzidenzmethode gesetzt. Das Prinzip ist in Abbildung 1 zu sehen. Die Photonen einer Lichtquelle treffen auf einen Strahlteiler. Aus den mittleren Zählraten der Detektoren R_T und R_B lässt sich mithilfe der Koinzidenz-Elektronik die mittlere

Koinzidenzzählrate R_{TB} zwischen den Detektoren für ein Zeitintervall Δt bestimmen (vgl. Thorlabs, 2023).

Aus diesen Daten kann man zusätzlich den Wert der Korrelationsfunktion zweiter Ordnung $g^{(2)}$ berech-

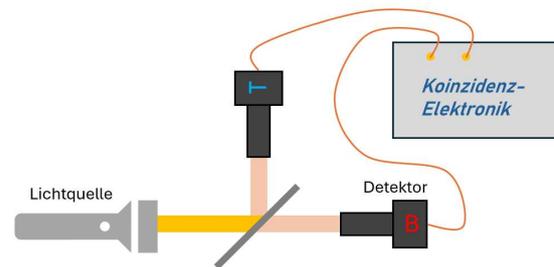


Abb. 1: Schematischer Aufbau eines Hanbury-Brown-Twiss-Experiments als Beispielexperiment für den Einsatz der Koinzidenzmethode (Eigene Darstellung).

nen und je nach Ergebnis (vgl. Tabelle 1) die vorliegende Statistik des Lichtes verifizieren (vgl. Fox, 2006, LaPierre, 2022, Thorlabs, 2023).

$$g^{(2)} = \frac{R_{TB}}{R_T R_B \Delta t} \quad \{1\}$$

Für Experimente mit Einzel-Photonen sollte der Wert < 1 sein.

2.1. Das „Quantum Optics Educational Kit“

Für Interferenzexperimente mit Einzel-Photonen braucht es einen geeigneten Aufbau. Dazu wurde das „Quantum Optics Educational Kit“ von Thorlabs verwendet, welches auf didaktisch optimierte Experimentiermaterialien setzt (vgl. Thorlabs, 2024). Eine Skizze des Aufbaus ist in Abbildung 2 zu sehen.

¹ SuS – Schülerinnen und Schüler

Tab. 1: Verschiedene quantenmechanische Zustände des Lichts. Für die Experimente mit Einzel-Photonen ist von Interesse, dass eine Sub-Poisson-Verteilung vorliegt (vgl. Fox, 2006, Thorlabs, 2023, LaPierre, 2022).

	antikorreliert	unkorreliert	korreliert
Photonenstrom
$g^{(2)}$	< 1	1	> 1
Zustand	Fock	kohärent	thermisch
Verteilung	Sub-Poisson	Poisson	Super-Poisson

Laserlicht der Wellenlänge 405 nm wird über zwei Spiegel auf einen Bariumborat-Kristall gelenkt (grün). Durch eine nichtlineare Wechselwirkung kommt es zur Emission eines Photonenpaares der Wellenlänge 810 nm (violett). Der Öffnungswinkel zwischen den Photonen von 6° ermöglicht es, das auf Detektor T zulaufende Photon als „signaler“ für die Koinzidenzmessung zu nutzen. Das „idler“-Photon läuft auf den Strahlteiler zu und kann so in das Michelson-Interferometer gelangen. Der Time-Tagger vergleicht, ob innerhalb eines Zeitfensters von 20 ns das zweite Photon an Detektor B (oder A) detektiert wird und es sich somit um eine Koinzidenz handelt (vgl. Thorlabs, 2023).

Im Interferometer ist ein Spiegel auf einem Piezo-Tisch montiert, der sich über einen Computer mit der entsprechenden Software bewegen lässt. In beide Arme des Interferometers können Polarisatoren eingesetzt werden (in Abbildung 2 mit eingezeichnet), die für den Versuch zum Quantenradierer benötigt

werden, ebenso der gestrichelt umrandete Polarisator vor Detektor B.

Alle optischen Komponenten sind mit ihrer Bezeichnung beschriftet und die Software, mit der die Messung gestartet und gestoppt wird, ist an das Experimentieren mit SuS angepasst. So gibt es zu verschiedenen Versuchen jeweils Tabs, in denen die relevanten Größen auch graphisch dargestellt werden und der Aufbau zum Experiment skizzenhaft zu sehen ist².

3. Entwicklung einer Versuchsanleitung

In dem Versuchsaufbau wird ein Laser der Klasse 3B zur Erzeugung der Photonenpaare verwendet. Deshalb beginnt die Anleitung auf der ersten Seite mit Warnhinweisen. Darauf folgen die Kapitel zu den Experimenten „Einzelphotonen-Michelson-Interferometer“, „Analogieversuch zum Quantenradierer“ und der „Quantenradierer“, die jeweils in die Unterkapitel „Versuchsgegenstand“, „Aufbau und Justage“ und „Durchführung und Aufgaben“ gegliedert sind.

Da die Versuchsanleitung sich an SuS der Oberstufe richtet, spielte das Prinzip der didaktischen Reduktion eine wichtige Rolle. Die Auswahl wesentlicher Elemente ist insbesondere bei der theoretischen Beschreibung eine Herausforderung, für die es in der Physikdidaktik keine eindeutige Lösung gibt (vgl. Hopf et al., 2022). Bei der Entwicklung einer Anleitung wurden unter anderem folgende Punkte berücksichtigt:

- a) Fehlvorstellungen zur Interferenz eines Photons. Wie in Abschnitt 3.1 erörtert wird, ist eine falsche Vorstellung nicht unwahrscheinlich. Die letzte

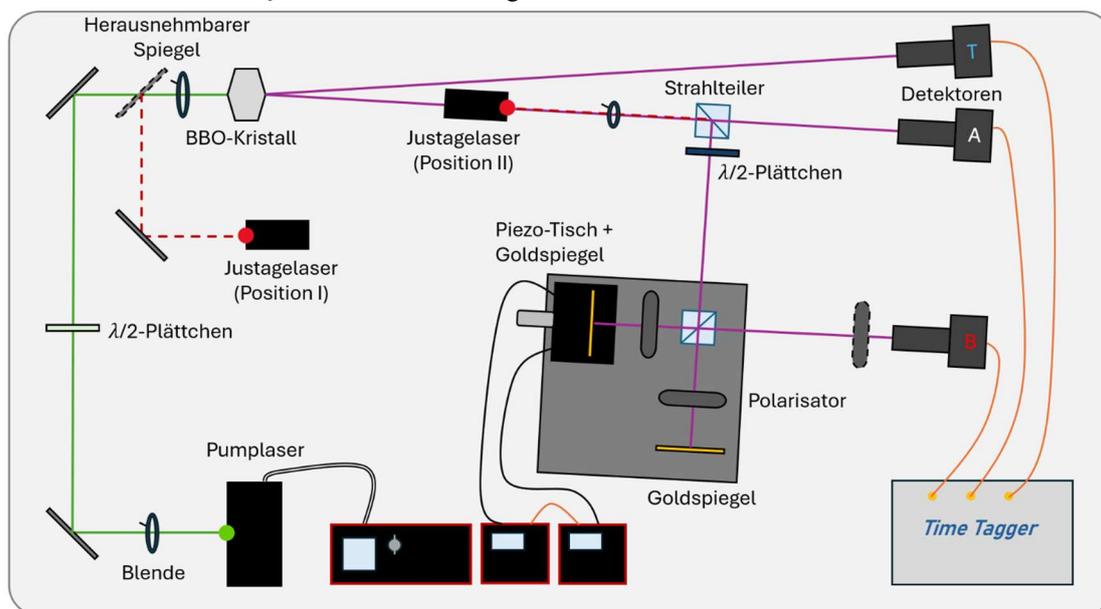


Abb. 2: Skizze vom Versuchsaufbau des Quantum Optics Educational Kit von Thorlabs (Eigene Darstellung nach Thorlabs, 2023, S.93, Abbildung 92)

² Mit dem Kit sind noch weitere Versuche möglich, auf die in diesem Beitrag nicht näher eingegangen wird.

Aufgabe zum Interferenz-Versuch soll einen kognitiven Konflikt erzeugen. Die Interferenz ist tatsächlich zu beobachten, aber es sind durchschnittlich nicht genug Photonen im Aufbau, damit zwei oder mehrere miteinander interferieren können. Außerdem liegt der Wert der Korrelationsfunktion zweiter Ordnung deutlich unter 1 und nahezu bei 0, was auch für Einzel-Photonen spricht. Im Kapitel zum Quantenradierer wird dies dann mit dem Superpositionsprinzip und Zuständen erklärt.

- b) Darstellung quantenmechanischer Beschreibungen. Für SuS ist der Umgang mit der Braket-Notation unbekannt. Auch das Rechnen mit linearen Formen (abgesehen von Spezialfällen wie dem Standardskalarprodukt) oder Operatoren geht über die Schulmathematik und -physik hinaus. Das Phänomen kann aber auch erklärt und verstanden werden, ohne die Ergebnisse mathematisch herzuleiten. Daher wurde auf eine qualitative Beschreibung gesetzt. So wird beispielsweise aus

$$\frac{1}{\sqrt{2}} (|1_1, 0_2, 45^\circ\rangle + |0_1, 1_2, 45^\circ\rangle) \quad \{2\}$$

diese Verbalisierung:

„Das Photon ist um 45° zur Tischebene polarisiert. Am Strahlteiler ergibt sich eine Superposition:

- Das Photon ist in Arm 1 reflektiert worden.
- Das Photon ist in Arm 2 transmittiert worden.“³

- c) Unterstützende Darstellungsformen. Skizzen der Aufbauten helfen dabei, einen Überblick zu bekommen und im Text erwähnte Bauteile wiederzuerkennen. Beispielsweise wird Abbildung 2 im Abschnitt zum Quantenradierer verwendet. Für die Justage des Interferometers wurde ein Video erstellt. Neben der Erklärung des nächsten Schrittes ist so direkt auch das beteiligte Gerät zu erkennen. So muss sich der SuS nicht fragen, wie zum Beispiel eine Justierhilfe aussieht. Andere Bilder erfüllen durch eine symbolische und logische Darstellung den Zweck, einen physikalischen Vorgang oder Zustand, der visuell nicht wahrnehmbar wäre (vgl. Kircher, 2015), aufzuzeigen. Ein Beispiel ist das Flussdiagramm (vgl. Abbildung 3) zur Änderung der Polarisationsrichtung eines Photons beim Durchlaufen des Aufbaus.

- d) Gezielte Wahl der Aufgaben. Experimente können vielfältige Beiträge zum Physikunterricht leisten, darunter Vermittlung von Fachwissen, Konzeptentwicklung, naturwissenschaftliches Arbeiten oder Interesse anzuregen (vgl. Hopf et al., 2022). Die richtige Wahl der Aufgaben kann die Wirkung des Experiments unterstützen. Fachwissen wird vermittelt, indem physikalische

Gesetze und daraus resultierende Vorhersagen überprüft werden. Das jeweilige Kapitel liefert

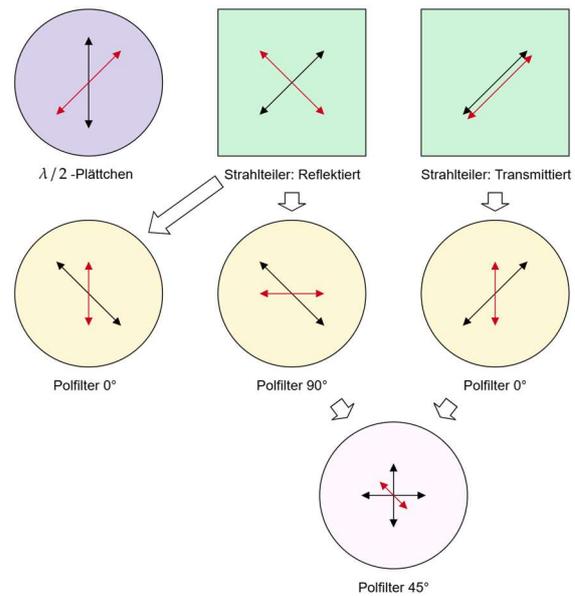


Abb. 3: Überblick über die Änderungen der Polarisation. In dieser Ansicht kommt das Licht „aus dem Blatt heraus“. Man schaut also von hinten durch das Bauteil. Der rote Doppelpfeil ist die Polarisationsrichtung nach, der schwarze vor dem Durchlaufen des Elements (Eigene Darstellung).

aufgrund der angeführten Gesetzmäßigkeiten eine Vorhersage zum Experiment. Die Aufgabe der SuS besteht darin, dies zu überprüfen.

Zur Konzeptentwicklung kann auch gehören, einen Konflikt zu erzeugen (vgl. Hopf et al., 2022). Sollte ein SuS die Vorstellung entwickeln, es würden mehrere einzelne Photonen miteinander interferieren, ergibt sich mit der letzten Aufgabe des ersten Versuchs ein Konflikt: Im Durchschnitt befinden sich zu wenig Photonen im Interferometer. Die Versuchsplanung, Durchführung und Auswertung helfen, experimentelle Fähigkeiten zu erwerben und so naturwissenschaftliches Arbeiten zu erfahren. Dadurch, dass das Experiment keinen Alltagsbezug hat, also etwas völlig Unbekanntes ist und durch den Radierereffekt ein bisher unerklärliches Phänomen auftritt, kann Interesse angeregt werden.

3.1. Einzelphotonen-Michelson-Interferometer

Im Kapitel zum Versuchsgegenstand wird zunächst die Interferenz im Wellenbild erklärt. Interferenz ist zwar Teil des Kernlehrplans (vgl. Ministerium für Schule und Bildung NRW, 2022), aber auch ein zentraler Gegenstand des Versuchs. Im Anschluss wird darauf hingewiesen, dass einzelne Photonen auch Interferenz zeigen. Zuletzt wird erklärt, wie aus dem Messergebnis die Wellenlänge der Photonen bestimmt werden kann.

³ Arm 1 ist der Arm, der auf den verstellbaren Piezotisch zuläuft (vgl. Abbildung 2).

Im nächsten Unterkapitel wird der Aufbau des Experiments beschrieben. Es wird auf ein Video verwiesen, in dem Schritt für Schritt das Interferometer justiert wird. Da geplant ist, das Experiment in Gruppen durchzuführen, sind die Erklärungen durch Untertitel gegeben. So kann man das Video schauen, ohne andere Teilnehmer zu stören. In der Anleitung ist zusätzlich eine Skizze aus der Vogelperspektive abgebildet, die die wichtigsten Komponenten des fertigen Aufbaus zeigt.

Zu Beginn der Durchführung wird noch einmal auf die Gefahren hingewiesen. Darauf folgen eine Beschreibung zur Durchführung der Messung und anschließend die Messaufgaben. Zwei haben vorgegebene Parameter, während für die dritte eine eigene Wahl für ein optimales, aber nicht zu zeitintensives Ergebnis getroffen werden soll. Mit den drei Messreihen lässt sich ein Mittelwert mit Abweichung für die Wellenlänge der Einzel-Photonen bilden. Um Messfehler oder eine Dejustage zuverlässiger zu erkennen, sind Beispiele zur Qualität der Messung gegeben. Zuletzt soll die durchschnittliche Photonenzahl bestimmt werden. Da die vorliegende Photonenzahl bei jeder Messung verifiziert wird und die Interferenz beobachtet wurde, soll so die unvermeidbare Schlussfolgerung sein, dass das Photon mit sich selbst interferiert.

SuS lernen im Physikunterricht, dass Photonen eine Wellenlänge zugeordnet werden kann (vgl. Ministerium für Schule und Bildung NRW, 2022). Die Vorstellung, dass ein einzelnes Photon mit sich selbst interferiert, entspricht jedoch keiner bekannten Vorstellung eines realen Objektes. Alltagsvorstellungen sind für SuS aber besonders relevant im Lernprozess (vgl. Kircher, 2015). Deshalb kann sich heimlich entweder die Vorstellung eines Teilchens oder einer Welle einstellen. Eine solche Vorstellung zu ändern, ist herausfordernd (vgl. ebd.). Dass die Interferenz eines einzelnen Photons real ist, erfahren die SuS in diesem Versuch. Diese kontraintuitive Beobachtung kann damit Teil ihrer eigenen Realität werden.

3.2. Analogieversuch zum Quantenradierer

Auch Polarisation ist Teil des Lehrplans Physik in der gymnasialen Oberstufe (vgl. Ministerium für Schule und Bildung NRW, 2022), wird aber aus demselben Grund wie die Interferenz beim vorigen Versuch noch einmal erörtert. Es wird darauf hingewiesen, dass Interferenz ebener Wellen bei senkrechter Polarisation zueinander verschwindet (vgl. Feld, 2014). Für diesen Versuch kann der Justagelaser verwendet werden, was das Risiko einer Gefährdung durch Laserlicht reduziert. Eine auf das Interferometer beschränkte Skizze ist in Abbildung 4 zu sehen. In das Interferometer sollen jetzt die Polarisatoren, zueinander gekreuzt, eingesetzt werden und ein Schirm am Ausgang des Interferometers positioniert werden. Da in jedem Arm einer der Polarisatoren steht, ist kein Interferenzbild zu sehen. Mit einem dritten Polarisator, der um 45° zu den beiden anderen verdreht ist, wird

die Interferenz wiederhergestellt. Dieser Versuch soll den SuS helfen, Gemeinsamkeiten und Unterschiede zum Quantenradierer herauszustellen.

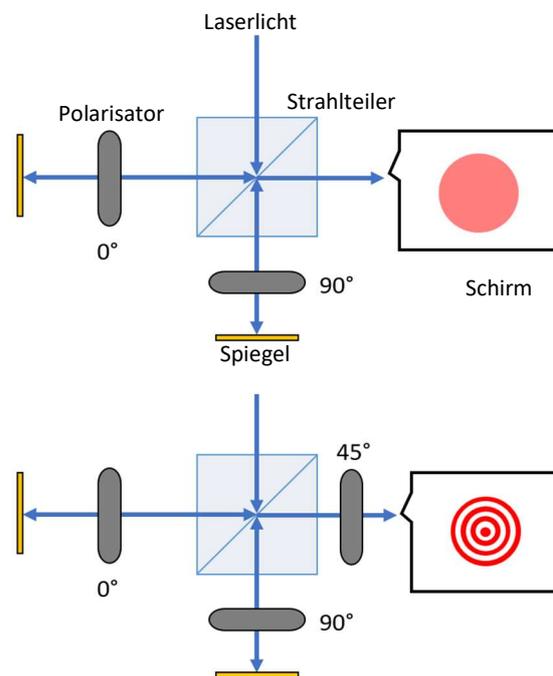


Abb. 4: Analogieversuch zum Quantenradierer. Oben: Werden Polarisatoren eingesetzt, die gekreuzt zueinander stehen, verschwindet das Interferenzbild. Unten: Durch Einsetzen eines dritten Polarisators in 45° -Stellung kann es wiederhergestellt werden (Eigene Darstellung).

3.3. Der Quantenradierer

Im Kapitel zum Versuchsgegenstand wird darauf hingewiesen, dass auch einzelne Photonen eine Polarisation besitzen, wobei nicht näher darauf eingegangen wird, wie dies zu begründen ist, da Konzepte wie der Spin unbekannt sind und eine weitere Erklärung nicht notwendig ist, um das Ergebnis zu verstehen. Die SuS werden schrittweise durch die Zustände geleitet, die vor und nach einem Bauteil vorliegen.

Die Durchführung beinhaltet wieder die Warnhinweise zum Laser und drei Messungen, die durchgeführt werden sollen. Dies sind Messungen mit (i) gleich ausgerichteten Polarisatoren, (ii) gekreuzten Polarisatoren und (iii) gekreuzten Polarisatoren mit Einsetzen des dritten Polarisators am Interferometer-Ausgang in 45° -Stellung. Eine Beispielmessung ist in Abbildung 5 zu sehen. Die letzte Aufgabe soll dazu motivieren, eine Vermutung für die geringere Zählrate bei der dritten Messung aufzustellen.

Durch die Wiederherstellung der Interferenz soll in Verbindung mit den Erkenntnissen aus den vorherigen Versuchen den SuS nicht nur zugänglich gemacht werden, dass die Interferenz einzelner Photonen möglich ist und von der Polarisation beeinflusst wird, sondern es sollen auch Fehlvorstellungen experimentell widerlegt werden. Hierzu gehört die Vorstellung,

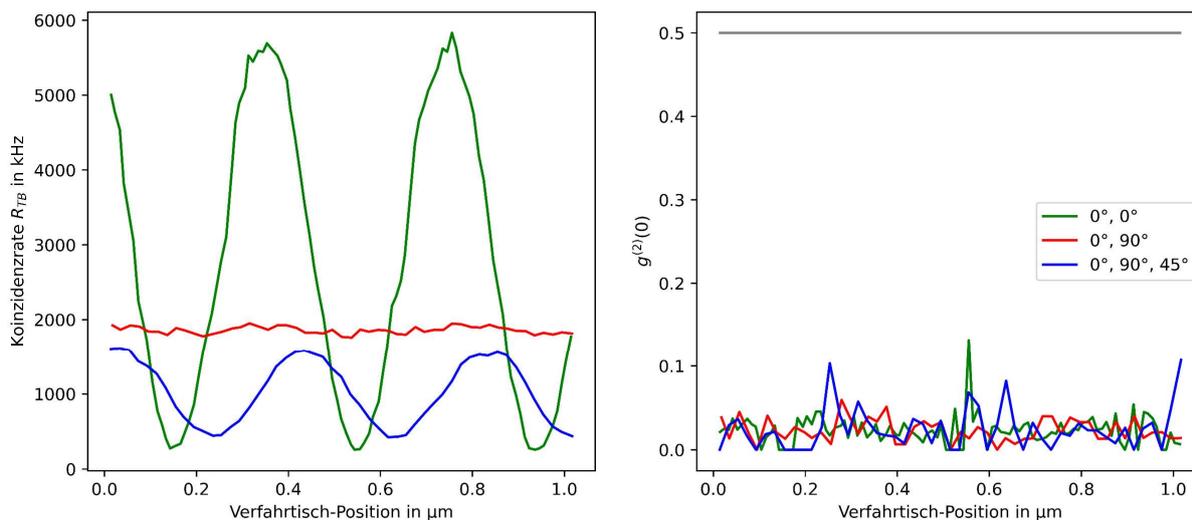


Abb. 5: Beispielmessung zum Quantenradierer. Die Polarisatoren werden wie im Analogieversuch eingesetzt. Links zeigt die Abbildung in grün das Interferenzbild für die Polarisatorstellung 0° in beiden Armen, in rot eine annähernd konstante Intensität für die Stellungen 0° und 90° und in blau die wiederhergestellte Interferenz mit geringerer Intensität durch einen dritten Polarisator bei 45° . Rechts ist zu sehen, dass die Korrelationsfunktion in allen Fällen deutlich unter 1 bleibt (Eigene Darstellung).

dass Photonen sich für einen Weg entscheiden müssen.

4. Ausblick

Der nächste Entwicklungsschritt ist ein Test der Anleitung, sowohl mit Studierenden als auch mit SuS. Es ist zu untersuchen, ob Formulierungen verständlich sind, das Konzept insgesamt übersichtlich ist und ob noch andere Hilfestellungen gebraucht werden. Darauf wird dann die Planung und Erprobung von Versuchstagen für SuS-Gruppen folgen. Entsprechend der Ergebnisse können dann Ergänzungsmaterialien für die SuS entwickelt werden. Sollten sich die SuS zum Beispiel für eine Videoanleitung aussprechen, wie sie im ersten Versuch zur Verfügung steht, könnte eine solche zum Aufbau des Quantenradierers entwickelt werden.

Außerdem ließe sich mit dem vorhandenen Material der Pool möglicher Versuche und damit auch die Versuchsanleitung erweitern. So ist es möglich, die Kohärenzlänge der Photonen zu bestimmen und Grundzüge des Quantencomputings auf optische Weise zu erfahren.

5. Literatur

- Feld, L. (2014): Experimentalphysik III: Optik und Quantenphysik, Aachen.
- Fox, A. M. (2006): Quantum optics: an introduction. New York: Oxford University Press.
- Hopf, M.; Schecker, H. und Wiesner, H. (2022): Physikdidaktik kompakt. 1. vollständig neu bearbeitete Auflage. Hannover: Aulis Verlag in Friedrich Verlag.
- Kircher, E. (2015): Methoden im Physikunterricht, in: Physikdidaktik Theorie und Praxis. 3. Aufl. Berlin: Springer.
- Kultusministerkonferenz (2020): Bildungsstandards im Fach Physik für die Allgemeine

Hochschulreife. Berlin: Sekretariat der Ständigen Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland.

LaPierre, R. (2022): Getting Started in Quantum Optics. Cham: Springer Nature.

Leybold (2025): Bestimmung der Wellenlänge eines He-Ne-Lasers mit einem Michelson-Interferometer. Abgerufen am 15.05.2025 von <https://www.leybold-shop.de/physik/versuche-sek-ii-universitaet/optik/wellenoptik/michelson-interferometer/bestimmung-der-wellenlaenge-eines-he-ne-lasers-mit-einem-michelson-interferometer/vp5-3-4-2.html>

Ministerium für Schule und Bildung des Landes Nordrhein-Westfalen (2022): Kernlehrplan für die Sekundarstufe II Gymnasium in Nordrhein-Westfalen Physik.

Thorlabs (2023): EDU-QOP1(M) Quantenoptik-Kit Benutzerhandbuch.

Thorlabs (2024): Quantenoptik-Kit. Abgerufen am 18.09.2024 von www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?object_group_id=15827&pn=EDU-QOP1/M

Weber, K. A.; Friege, G.; Scholz, R. (2020): „Quantenphysik in der Schule – Was benötigen Lehrkräfte? Ergebnisse einer Delphi-Studie.“ In: Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften 26, S. 173-190.

NV-Zentrum Magnetometer und sein didaktisches Konzept

Simon Koppenhöfer*, Philipp Mauz*, Philipp Scheiger*

*Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 57, 70569 Stuttgart
koppe@pi5.physik.uni-stuttgart.de

Kurzfassung

Dieser Konferenzbeitrag stellt ein NV-Zentrum Magnetometer Aufbau für den Lehrkontext vor. Im Vergleich zu anderen Anwendungen (bspw. kalte Atome, Ionen oder Supraleiter) der Quantenmechanik kann ein solches Experiment günstig, ungiftig, bei Raumtemperatur, ... also didaktisch vielversprechend aufgebaut werden. Mit ansprechenden Kontexten aus der Biologie und der Medizin, versucht das hier vorgestellte didaktische Konzept die Motivation für quantenmechanische Inhalte zu generieren. Weil diese Inhalte im Bereich der NV-zentren Magnetometer über die Lehrpläne in Deutschland hinausgeht, wird in ein Basis- und ein Expertenniveau unterteilt. In Letzterem sind ebenfalls zusätzliche verwandte Experimente in Entwicklung, die das erweiterte didaktische Konzept zum Beispiel für außerschulische Lernorte attraktiv gestalten soll.

1. Motivation

Durch einen stärkeren Fokus auf die Entwicklungen zu mehr Quantenmechanik (QM) in den deutschen Lehrplänen [1,2], steigt die Nachfrage von Lehrkräften zu passenden didaktischen Experimenten für den Schulunterricht. Besonders gerne werden SuS historisch an die Quantenmechanik herangeführt, dadurch könnten die Anwendungen der (QM) im Schulunterricht an den Rand gedrängt werden. Doch gerade diese Stunden könnten den SuS helfen die QM als relevant zu empfinden. Das NV-Magnetometer und seine Anwendungen in der Biologie und Medizin könnten hier Abhilfe schaffen und ebenfalls aufzeigen/erweitern welche experimentellen Möglichkeiten im QM-Unterricht bestehen.

Dieser Beitrag wird im folgenden Kapitel das NV-Zentren Magnetometer näher betrachten, um danach die extrahierten Elemente jeweils ihren eigenen Platz im einhüllenden didaktischen Konzept einzuräumen. Auf diese Weise schließen schließt sich ein Kapitel zu Fluoreszenz an, in dem es um die Energieniveaus im NV-Zentrum geht. Es wird für diese Niveaus die Spineigenschaft von Quantenobjekten im Messablauf relevant, sodass auch hier ein Kapitel folgt. Um den Bogen zur Magnetfeldmessung inhaltlich ganz abzudecken, wird der Zeeman Effekt im nächsten Kapitel besprochen. Der Beitrag schließt mit einer Betrachtung der Adressaten.

2. NV-Zentren Magnetometer

NV-Zentren sind Gitterfehler in Diamanten siehe hierzu Abbildung 1. Hier steht das N für ein Stickstoffatom das ein Kohlenstoff ersetzt, das V steht für eine Fehlstelle. Diese punktförmige Fehlstelle bindet Elektronen an sich, die innerhalb der Bandlücke des Diamanten verschieden gebundene Zustände annehmen können, die in Abbildung 2 visualisiert sind.

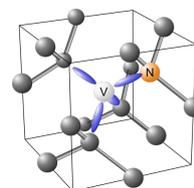


Abb. 1: Schemata eines Ausschnitts des Diamantgitters mit NV-Zentrum. N symbolisiert ein Stickstoffatom und V eine Gitterfellestelle. (Eigene Darstellung)

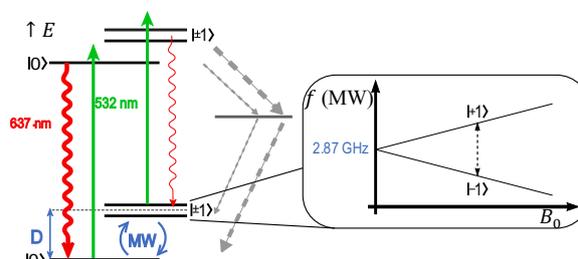


Abb. 2: Energieleveldiagramm eines NV-Zentrums. Grüne Pfeile zeigen optische Anregung an und rote Pfeile optische Emission jeweils in der charakteristischen Farbe mit Wellenlängenangaben. Graue Pfeile zeigen nichtoptische Übergänge an. Generell gilt je Farbe für jeweils den rechten/linken Satz eine andere Übergangswahrscheinlichkeitsaufteilung angedeutet mit der Dicke der Pfeile. Im rechten Inset ist der Zeeman Effekt für die spinversetzten Zustände angedeutet. (Eigene Darstellung)

Grünes Licht wird hier verwendet um Elektronen aus dem Grundzustand anzuregen. Durch Fluoreszenz kann mit bestimmter Wahrscheinlichkeit daraufhin rotes Licht emittiert. Dieser Prozess findet ebenfalls für die spinversetzten Zustände statt, nur dass sich die Helligkeit unterscheidet [3]. Mit Mikrowellen der richtigen Frequenz und Auslesen der Helligkeit kann man so mit einem Spektrum wie in Abbildung 3 zu sehen, die Energie der Spin ± 1 Niveaus abtasten und über den Zeeman-Effekt daraus das Magnetfeld

bestimmen. Diese Messmethode wird Optical Detected Magnetic Resonance (ODMR) genannt und findet allmählich ihren Platz in der Industrie [4].

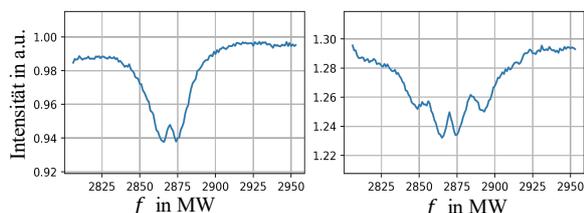


Abb. 3: Beispielhafte ODMR-Spektren für zwei verschiedenen Magnetfeldzustände gemessen mit dem Laborinspirierten offenen Messaufbau. Mehr als zwei Intensitätsminima geben zusätzlich Auskunft über die Richtung des Magnetfeldes [3]. (Eigene Darstellung)

In der Biologie und Medizin sind die biokompatiblen Diamanten mit vernachlässigbarem Ausbleichen zum Beispiel bereits bekannte Biomarker [5].

In der Didaktik gibt es einige Bemühungen die ODMR als Anwendung der Quantenmechanik gewinnbringend in die Lehre einzubetten [6-8]. Die Bemühungen speziell hierfür sind wohl dadurch begründet, dass die NV-Zentren Anwendung wenig Konkurrenz genießt, immerhin zeigt sich QM typischerweise erst sobald es kalt, klein, kurzweilig, sehr teuer, sehr dunkel, oder giftig wird. NV-Zentren allerdings setzen erhöhte Ansprüche an die fachliche Tiefe der Lerneinheit, denn Begriffe wie Fluoreszenz, Übergangswahrscheinlichkeit, Spin oder Zeeman-Effekt bleiben in deutschen Lehrplänen unberücksichtigt.

Die fachlichen Hürden können als Anlass genommen werden, um das NV-Zentren Magnetometer als Black-Box Messinstrument zu verwenden und/oder es inhaltlich allenfalls oberflächlich zu behandeln. Ergänzend stellen wir in den nächsten Kapiteln hauptsächlich vor wie eine didaktische Aufbereitung des physikalischen Inhalts gelingen kann.

2.1. Fluoreszenz

Fluoreszenz ist alltagsnah und optisch einfach zugänglich, deshalb ist ein Experiment didaktisch anregend gestaltbar. Physikalisch sind diskrete Energien von Zuständen mit optischen Übergängen relevant. Diskrete Energien z.B. im eindimensionalen unendlich hohen Potentialtopf sind Teil deutscher Lehrpläne (KMK-Standards) und können im Kontext von Fluoreszenzmolekülen wie (Aesculin in Kastanien siehe hierzu Abbildung 4, Chlorophyll im Blattgrün, Betacarotin) behandelt werden. Auch Quantenpunkte, F-Zentren in Salzen, oder das Wasserstoffatom mit der Balmerreihe sind erwähnenswert. Die Farbzentren (F-Zentren) in Salzen sind genauso wie die NV-Zentren im Diamanten Störungen der Gitterstruktur. Diese Ähnlichkeit lässt sich gewinnbringend für den Verständnisaufbau verwenden. Mit dem Auge sichtbare Fluoreszenz ist hingegen bei den oft verwendeten Fluoreszenzmolekülen anzutreffen. Die Fluoreszenz kann z.B. durch einfache UV-

Bestrahlung hervorgerufen werden, sodass sie Schüler und Schülerinnen (SuS) ermöglicht Experimente zu machen. Je nach Molekül gibt es hier bereits Bezüge zu anregenden Kontexten aus Biologie und Medizin [9,10].



Abb. 4: Zu sehen ist ein Fluoreszenzexperiment mit dem Molekül Aesculin aus einem Kastanienast. Angeregt wird der in warmen Wasser gelöste Stoff mit einer UV-Lampe bei 365 nm Wellenlänge. (Eigene Darstellung)

Um am NV-Zentren im Diamanten die Fluoreszenz vorzustellen, ist bereits das Fluoro-Kit entstanden. Kern dieses SuS Experimentieretups ist ein günstiger Mikrodiamant, der wahlweise mit blau, grün, orange oder rotem LED-Licht angestrahlt werden kann. Ein typisches Problem bei Experimenten zu NV-Zentren ist es das Anregungs- vom Fluoreszenzlicht zu separieren. Das geschieht hier mit einem Farbfilter, der vorwiegend rotes Licht transmittiert. Die begleitende Experimentieranleitung zum Fluoro-kit fokussiert auf Farbwahrnehmung, Spektren und die Auswirkungen eines Farbfilters. Beispielhafte Spektren sind in Abbildung 5 abgebildet.

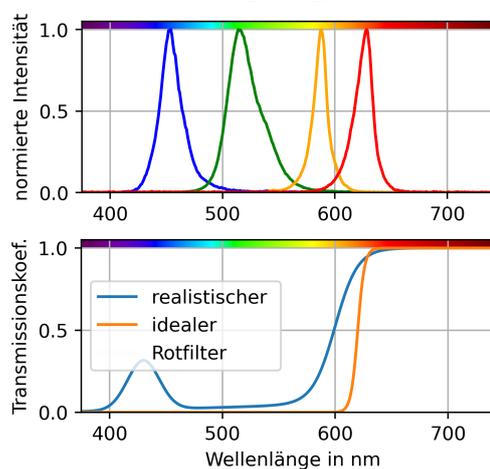


Abb. 5: Zu sehen sind Auszüge aus dem Begleitmaterial zum Fluoro-Kit. Das obere Bild zeigt gemessene Spektren der verbauten LEDs. Das untere Bild zeigt beispielhafte Transmissionskurven von Rotfiltern. Eine Fragestellung im Begleitmaterial fragt nach den resultierenden Spektren hinter den Farbfiltern. (Eigene Darstellung)

Mit diesem Hintergrundwissen können am Ende des Experiment SuS mit Überzeugung behaupten einen leuchtenden Diamanten zu sehen. Die verwendeten Mikrometer großen Diamanten sind günstig (<1 Euro

[11]) und erlauben es über einen Klassensatz Experimentierkits nachzudenken.

2.2. Spin

Weil sie nicht explizit in den Bildungs- und Lehrplänen Physik stehen, sind Berührungspunkte von SuS mit dem Spin Begriff aus der QM spät bzw. gar nicht vorhanden. Die wahrscheinlichsten Berührungspunkte sind zu finden in der Medizin (Magnet Resonanz Tomographie MRT) und in der Chemie beim Einordnen von Elektronen in Orbitale. Für die Behandlung der NV-Zentren bieten sich hier interessante Anknüpfungspunkte, aber auch die Notwendigkeit für weiterführende didaktische Konzepte. Ein gern gewählter Ansatz ist das Elektron, oder besser sein magnetisches Moment, mit einem Stabmagneten zu vergleichen und dadurch erklärbar zu machen, dass es ausrichtende bzw. anziehende Kräfte im Magnetfeld bzw. Magnetfeldgradienten gibt. Die Namensgebung des Spins und der Drehimpuls des Elektrons bleiben so unberücksichtigt. Auch die Quantisierung von Drehimpuls und magnetischem Moment sind zunächst didaktisches Autoritätswissen.

Mit einem Aufbau zum Einstein-de-Haas Effekt, wie in Abbildung 6 abgebildet, kann auf die Verknüpfung von magnetischem Moment und Drehimpuls hingearbeitet werden. Der Aufbau ermöglicht es außerdem über (mechanische) Resonanzmessmethoden zu sprechen, und bietet sich auch deshalb an, da Relevanz und Interesse an medizinischen MRT-Aufnahmen genutzt wird.

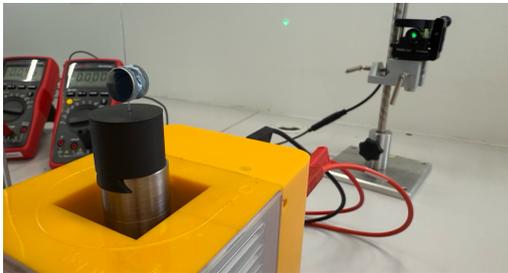


Abb. 6: Gezeigt wird ein vorläufiger Aufbau zum Einstein-de-Haas Experiment. Um die Auslenkung des Pendels zu verdeutlichen, wird ein Laserstrahl vom Pendel an die Wand reflektiert. (Eigene Darstellung)

Eine didaktische Vorstufe des bildgebenden MRT-Verfahrens ist die Elektronen Spin Resonanz (ESR) zum Beispiel aus dem Bereich der analytischen Biologie [12]. Bei der ESR werden ungepaarte Elektronen magnetisch ausgerichtet, sodass die Entartung der beiden Spinzustände aufgehoben wird. Die Quantelung der Zustände des Spins im Kontrast zu beliebiger Orientierung eines Stabmagneten gehen aus diesem Experiment hervor.

2.3. Zeeman Effekt

Durch ein Experiment zur ESR soll für die didaktische Aufbereitung des NV-Zentren Magnetometers auch der nötige Zeeman-Effekt isoliert und ansprechend dargestellt werden. Außerdem sind

mechanische abstrahierte Analogieexperimente in Planung, um das Verständnis zu erleichtern.

3. Adressatenfeld und Umsetzung

Die höchste Sichtbarkeit lässt sich mit dem NV-Zentren Magnetometer als Exponat auf Messen, Veranstaltungen, oder bei Vorträgen generieren. Für solche physikalisch recht oberflächlichen Lernumgebungen sind, prägnante Demonstratoren wie das Fluoro kit und TheLämp entstanden. Zweiteres ist eine modifizierte Taschenlampe um einen Mikrodiamanten im Kern. Geplant ist für diese Zwecke noch eine miniaturisierte Variante, um den Diamanten in einer Messsonde anwendungsbezogen zum Nachweisen von Magnetfeldern zu nutzen.

Ein zweiter Ansatz beginnt im Kontext einer freiwilligen zweiwöchigen Schülerakademie mit offenen forschenden Aufgabenstellungen um das NV-Zentrum im Kontext der Bioquantenphysik. Basierend auf diesem außerschulischen Lernort wird versucht hilfreiche Konzepte abzuleiten, um Materialien für das NV-Zentrum Magnetometer zu erarbeiten. Da einige physikalische Inhalte dieses Magnetometers nicht in Lehrplänen zu finden sind, zielen die Materialien auf den Einsatz in einem halbtägigen Schülerlabortermin ab, oder werden für Lehrkräfte in der Aus- und Fortbildung eingesetzt.

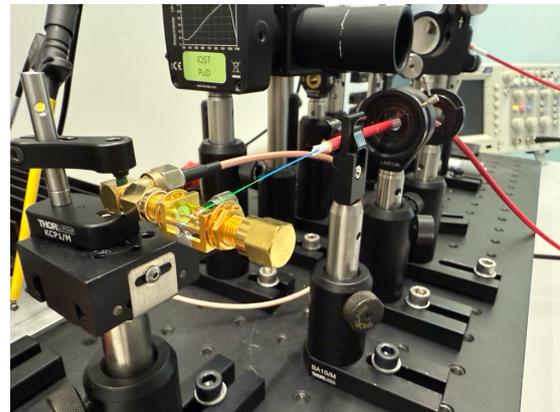


Abb. 7: Laborinspirierter ODMR Aufbau mit diskret gebauter Mikrowellenantenne und rot fluoreszierendem Diamant im Vordergrund. (Eigene Darstellung)

Der zweite inhaltlich tiefere Ansatz basiert aktuell auf einem authentischen offen aufgebauten ODMR Messstand, wie in Abbildung 7 gezeigt. Im Hintergrund verwendet dieser eine Kombination aus einer interaktiven (H5P-basierten) Lernplattform und einem interaktiven Steuerungspanel für das Experiment. Diese Werkzeuge führen die Lernenden durch jeden Schritt des NV-Zentrum-Experiments – unabhängig davon, ob sie vor Ort sind oder virtuell auf den Versuchsaufbau zugreifen. Die Lernplattform soll weitergehend sowohl praktische Anleitungen zum Aufbau und zur Justage als auch im Wechsel theoretische Hintergründe zum NV-Zentrum-Experiment sowie zu den ergänzenden Experimenten enthalten.

4. Literatur

- [1] Kultusministerkonferenz Deutschland (Hrsg.) (2020): Bildungsstandards im Fach Physik für die Allgemeine Hochschulreife. Url: https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen_beschluesse/2020/2020_06_18-BildungsstandardsAHR_Physik.pdf (Stand: 4/2025)
- [2] Stadermann, H. K. E.; van den Berg, E.; Goedhart, M. J.; (2019): Analysis of secondary school quantum physics curricula of 15 different countries: Different perspectives on a challenging topic. In: Phys. Rev. Phys. Educ. Res., 15, 1, Url: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevPhysEduRes.15.010130> (Stand: 4/2025)
- [3] Ziem, Florestan; (2019): Nanometric magnetic resonance imaging with a wide field of view. In: Online Publications of University Stuttgart, Url: <http://dx.doi.org/10.18419/opus-10497> (Stand 3/2025)
- [4] Homepage von Quantum Design (Verkäufer industrieller NV-Zentren basierten Messinstrumente): <https://qd-europe.com/de/de/produkte/magnetismus/nv-mikroskopie-stickstoffvakanz-mikroskopie/> (Stand: 5/2025)
- [5] Bondon, Nicolas; Raehm, Laurence; Charnay, Clarence; Boukherroub, Rabah; Durand, Jaen-Oliver; (2020): Nanodiamonds for bioapplications, recent developments. In: Journal of Materials Chemistry B, 8, 48, S. 10878-10896, Url: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2020/tb/d0tb02221g> (Stand: 10/2024)
- [6] Haverkamp, Nils; Pusch, Alexander; Heusler, Stefan; Gregor, Markus (2022): A simple modular kit for various wave optic experiments using 3D printed cubes for education. In: Phys. Educ., 57, 2, Url: <https://dx.doi.org/10.1088/1361-6552/ac4106> (Stand: 1/2025)
- [7] Mariani, G.; Umemoto, A.; Nomura, S.; (2022): A home-made portable device based on Arduino Uno for pulsed magnetic resonance of NV centers in diamond. In: AIP Advances, 12, 065321, Url: <https://doi.org/10.1063/5.0089161> (Stand: 2/2024)
- [8] Stegemann, Jan; Peters, Marina; Horsthemke, Ludwig; Langels, Nicole; Glösekötter, Peter; Heusler, Stefan; Gregor, Markus; (2023): Modular low-cost 3D printed setup for experiments with NV centers in diamond. In: Eur. J. Phys., 44, 3, Url: <https://dx.doi.org/10.1088/1361-6404/acbe7c> (Stand: 10/2025)
- [9] Autschbach, Jochen; (2007): Why the Particle-in-a-Box Model Works Well for Cyanine Dyes but Not for Conjugated Polyenes. In: J. Chem. Educ., 84, 11, Url: <https://doi.org/10.1021/ed084p1840> (Stand: 11/2024)
- [10] McPherson, Peter A. C.; Alphonso, Lynsey; Johnston, Ben M.; (2024): The quantum mechanics of skincare: A context for the biochemistry curriculum. In: Biochemistry and Molecular Biology Education, 52, 4, S. 403-410, Url: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/bmb.21827> (Stand: 5/2025)
- [11] Homepage von Adamasnano (Hersteller NV-dotierter Mikrodiamanten): <https://www.adamasnano.com/fluorescent-microdiamond> (Stand: 5/2025)
- [12] Sahu, Indra D.; McCarrick, Robert M.; Lorigan, Gary A.; (2013): Use of EPR to Solve Biochemical Problems. In: Biochemistry, 52, 35, Url: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3839053/> (Stand: 5/2025)

Danksagung

Wir danken den Kooperationspartnern von der Hahn-Schickard-Gesellschaft, dem Institut für Intelligente Sensorik und theoretische Elektrotechnik und re:edu für die fruchtbare Zusammenarbeit. Wir danken dem BMFTR für die Förderung unter dem Förderkennzeichen 13N16731.

Praxisorientiertes Fortbildungskonzept für Lehrkräfte mit Selbstlerneinheiten zur Quantenphysik

- Fokus auf dem Nachweis der Quantennatur des Lichts und der Erzeugung einzelner Photonen -

Kim Kappl*, Stefan Aehle⁺, Philipp Scheiger*

*Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 57, 70569 Stuttgart ⁺Friedrich-Schiller-Universität Jena, August-Bebel-Straße 4, 07743 Jena
kkappl@pi5.physik.uni-stuttgart.de

Kurzfassung

Anknüpfend an einen gleichnamigen Vortrag werden hier Ergebnisse der Kooperation zweier Arbeitsgruppen der Universität Stuttgart und Friedrich-Schiller-Universität Jena vorgestellt, die daran arbeiten, einen Teil des hohen Bedarfs an Lehrerfortbildungen zur Quantenphysik zu decken. In diesem Beitrag wird ein didaktisches Konzept rund um die Eigenschaften einzelner Photonen näher erläutert. So wird beispielsweise in einem interaktiven, aktivierenden Moodle-Kurs die Erzeugung einzelner Photonen basierend auf Grundlage der Spontaneous Parametric Down Conversion (SPDC) vorgestellt.

1. Motivation

Durch die Einführung der neuen Bildungsstandards der Kultusministerkonferenz aus dem Jahr 2020 [1] wurden die Fachinhalte aus dem Bereich der Quantenphysik und Materie zunehmend gestärkt. Teilweise wurden neue Begriffe, wie beispielsweise das „quantenmechanische Weltbild hinsichtlich der Begriffe Realität, Lokalität, Kausalität und Determinismus“ oder die „Koinzidenzmethode zum Nachweis einzelner Photonen“ in die Bildungsstandards übernommen, obwohl nur sehr wenige Lehrkräfte unter diesen Begriffen etwas verstehen.

Aus diesem Grund wurde eine Kooperation zwischen den Arbeitsgruppen „Physik und ihre Didaktik“ der Universität Stuttgart und der „AG Fachdidaktik der Physik und Astronomie“ der Friedrich-Schiller-Universität Jena ins Leben gerufen, welche einem möglichen Fortbildungsbedarf zu den neuen (und alten) Themen der Quantenphysik und Materie gerecht werden soll.

Im Laufe dieses Artikels wird zunächst das grobe Konzept der geplanten Fortbildung erläutert. Im Anschluss folgt eine detailliertere Analyse des Teils zur Koinzidenzmethode zum Nachweis einzelner Photonen. Hier werden die einzelnen Kurse näher erläutert. Daran anknüpfend werden Experimente zum vertieften Verständnis der theoretischen Fachinhalte vorgestellt.

2. Fortbildungskonzept

Die geplante Fortbildung besteht aus insgesamt drei Teilen: der Selbststudiums-, der Online- und der Präsenzphase.

In der Selbststudiumsphase bekommen die Lehrkräfte die Möglichkeit, sich die Fachinhalte mithilfe eines Moodle-Kurses eigenständig zu erarbeiten. Der

Moodle-Kurs ist in die folgenden vier Teile gegliedert (vgl. Abbildung 1):

- Fachinhalte Quantenphysik (Kurse Q1 bis Q7),
- Fachinhalte Atomphysik und Materie (Kurse A1 bis A8),
- Unterrichtsmaterialien,
- Weiterführende Links und Verweise.

Unter den jeweiligen Fachinhalten sind mehrere Einzelkurse zu finden, in denen die physikalischen Inhalte in Form von interaktiven H5P-Dateien aufgearbeitet sind. Diese dienen den Lehrkräften zur eigenständigen Erarbeitung der Fachinhalte. In der Kategorie „Unterrichtsmaterialien“ sind Bilder, Videos, Tafelbilder, Übungsaufgaben, etc. zu finden, welche die Lehrkräfte zu ihrer freien Verfügung für ihren Unterricht einsetzen dürfen und sollen.



Abb. 1: Screenshot der Aufteilung der Inhalte im Moodle-Kurs. Eigene Abbildung.

Nach der Selbststudiumsphase folgt eine Online-Sitzung, in welcher die jeweiligen Inhalte nochmal besprochen werden können und Raum für etwaige Fragen gegeben wird. Des Weiteren können hier mögliche Ideen für Unterrichtsumsetzungen diskutiert werden.

Zuletzt folgt eine Präsenzveranstaltung, um die in der Theorie erlernten Inhalte in der Praxis zu sehen. Die Präsenzveranstaltung dient also zur Demonstration aufwändiger Experimente, aber auch zur Inspiration neu entwickelter Schulexperimente.

Eine ausführlichere Darstellung der geplanten Fortbildung ist in einem gleichnamigen Beitrag zu finden [2]. Im Laufe dieses Artikels wird jedoch genauer auf einen Kurs eingegangen, und zwar auf den Kurs aus dem Bereich „Fachinhalte Quantenphysik“ mit dem Titel „Q1: Die Koinzidenzmethode zum Nachweis einzelner Photonen“.

3. Kurs Q1: Die Koinzidenzmethode zum Nachweis einzelner Photonen

Der Kurs Q1 zur Koinzidenzmethode zum Nachweis einzelner Photonen ist in insgesamt drei kleinere Kurse unterteilt:

3.1. Kurs Q1.1: Das Hanbury-Brown-Twiss-Experiment

In diesem Kurs wird zunächst das grundlegende Experiment zum Nachweis einzelner Photonen dargestellt: Das Hanbury-Brown-Twiss-Experiment, bestehend aus lediglich einem Strahlteiler, zwei Einzelphotonendetektoren und einem TimeTagger, welcher die Koinzidenzen zwischen den Signalen der beiden Detektoren zählt. Nach der Beleuchtung der einzelnen Komponenten wird eine Überlegung angeführt, was passieren würde, wenn in den Versuchsbau eine klassische elektromagnetische Welle einfallen würde, im Vergleich zu einem einzelnen, unteilbaren Teilchen. Dies führt zur Unterscheidung zwischen der Messung von Koinzidenzen im Falle einer einfallenden elektromagnetischen Welle und der Messung von Anti-Koinzidenzen im Falle eines unteilbaren Teilchens. Da sich Letzteres im Jahr 1977 erstmals durch H. J. Kimble et al. experimentell bestätigen ließ [3], bietet das Hanbury-Brown-Twiss-Experiment (im Gegensatz zum in der Schule eher weit verbreiteten fotoelektrischen Effekt) einen direkten Beweis für die Quantennatur des Lichts.

Dieser Kurs ist als absolutes Grundwissen zum Thema der Koinzidenzmessung anzusehen, welches zum Unterrichten in der Schule relevant ist. Alle weiteren Kurse (Q1.2, Q1.3 und Q6) stellen Vertiefungsthemen dar und sind im Moodle-Raum auch explizit als solche gekennzeichnet.

3.2. Kurs Q1.2: Einzelphotonendetektion

In diesem Kurs wird die Funktionsweise einer sogenannten Avalanche-Photodiode, welche heutzutage in der Regel zur Detektion einzelner Photonen eingesetzt wird, erklärt. Dabei wird ebenfalls auf etwaige Störfaktoren, wie beispielsweise das Afterpulsing (Nachpulsen), die Dark Counts (Dunkelrauschen) und die Totzeit der Detektoren eingegangen. Ein beispielhafter Auszug aus der zu diesem Thema erstellten H5P-Datei ist in Abbildung 2 zu sehen.

3.3. Kurs Q1.3: Photonenstatistik

In diesem letzten Kurs wird die Koinzidenzmessung im Rahmen der Photonenstatistik detailliert erläutert. Dabei wird die sogenannte Korrelationsfunktion 2. Ordnung (kurz: $g^{(2)}$ -Funktion) hergeleitet, da sie im

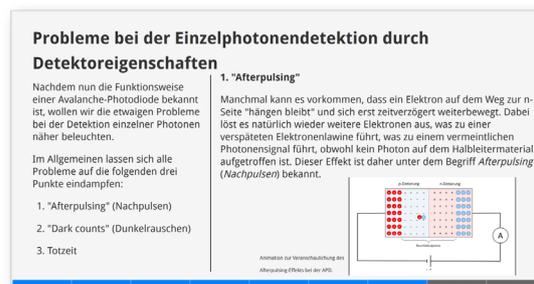


Abb. 2: Exemplarischer Auszug aus der H5P-Datei „Q1.2: Einzelphotonendetektion“ des Moodle-Kurses. Eigene Abbildung.

Rahmen statistischer Betrachtungen verschiedener Lichtquellen eine tragende Rolle spielt. Durch den Einsatz mehrerer interaktiver Aufgaben sollen die Lernenden zum Mitdenken angeregt werden.

Zum Abschluss werden die drei unterschiedlichen Arten von Lichtquellen (Einzelphotonenquelle, kohärente und thermische Lichtquelle) näher erläutert und graphisch dargestellt. Das Erlernte wird im Anschluss daran in einem abschließenden Quiz auf spielerische Weise abgeprüft. In Abbildung 3 ist ein Auszug aus dem Moodle-Kurs zu sehen.

Obwohl diese Inhalte nicht direkt schulrelevant sind, stellen sie dennoch einen maßgeblichen Teil zum vertieften Verständnis des Messmechanismus bei Einzelphotonenquellen dar und bieten daher einen Mehrwert für interessierte Lehrkräfte.

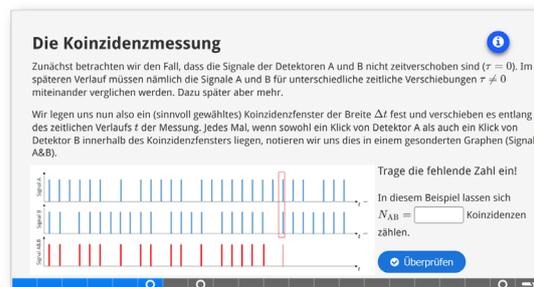


Abb. 3: Exemplarischer Auszug aus der H5P-Datei „Q1.3: Photonenstatistik“ des Moodle-Kurses. Eigene Abbildung.

4. Kurs Q6: Weiterführende Inhalte

Der Kurs Q6 ist speziell an Lehrkräfte gerichtet, welche nach einer deutlichen Vertiefung der vorangegangenen Kurse Q1 bis Q5 suchen. Bisher besteht der Kurs lediglich aus dem Unterkurs „Q6.1: Methoden zur Erzeugung einzelner Photonen – SPDC“. Dies soll im Laufe der Entwicklung des gesamten Online-Kurses noch um weitere Themen, wie beispielsweise verschiedene Quantentechnologien, wie das Quantencomputing, die Quantenkryptografie oder die Quantensensorik erweitert werden. Im weiteren Verlauf dieses Beitrags wird jedoch lediglich auf den bereits bestehenden Kurs zur Parametrischen Fluoreszenz (englisch: spontaneous parametric down conversion, kurs: SPDC) eingegangen werden.

4.1. Kurs Q6.1: Methoden zur Erzeugung einzelner Photonen – SPDC

Selbstverständlich gibt es mehrere vielversprechende Kandidaten für mögliche Einzelphotonenquellen. So beispielsweise NV-Zentren [4], Quantenpunkte [5] oder andere künstliche Atome. Im Rahmen dieses Online-Kurses wurde sich bisher jedoch lediglich auf die Erzeugung einzelner Photonen basierend auf dem Prinzip der Parametrischen Fluoreszenz fokussiert, da sich dies vergleichsweise einfach experimentell umsetzen lässt und wohl am anschlussfähigsten für die Schule ist.

Im Laufe des Kurses erarbeiten sich die Teilnehmenden, welche Komponenten zur Erzeugung einzelner Photonenpaare notwendig sind und welche Bedingungen vorherrschen müssen, damit diese erzeugt werden können. Eingebaute interaktive Aufgaben (vgl. Abbildung 4) sollen das Verständnis der Fachinhalte fördern und auf die experimentelle Umsetzung in der Präsenzveranstaltung vorbereiten. Mehr hierzu folgt im nächsten Abschnitt.

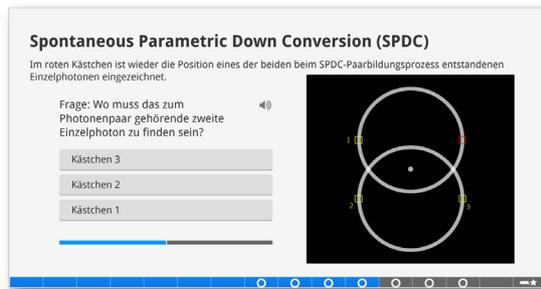


Abb. 4: Exemplarischer Auszug aus der H5P-Datei „Q6.1: Methoden zur Erzeugung einzelner Photonen – SPDC“ des Moodle-Kurses. Eigene Abbildung.

5. Umsetzung in der Präsenzveranstaltung

Um die im Laufe des Online-Kurses angeeigneten Fachinhalte auf einer experimentellen Ebene nachvollziehen zu können, sowie in Austausch mit anderen Lehrkräften zu treten, wird am Ende des Fortbildungskurses eine Präsenzveranstaltung angeboten.

Die im Rahmen dieser Veranstaltung präsentierten Experimente werden im folgenden Verlauf näher beleuchtet.

5.1. Einzelphotonenexperimente mit dem Quantenoptik-Kit von Thorlabs

Das vor wenigen Jahren erschienene Quantenoptik-Kit aus der Linie der Educational Kits der Firma Thorlabs bietet einen einmaligen Zugang zur Erzeugung und dem Nachweis einer angekündigten Einzelphotonenquelle unter Einsatz eines nichtlinearen BBO-Kristalls [6].

Der Einsatz dieses Experiments im Rahmen der Lehrerfortbildung erlaubt die Demonstration quantenphysikalischer Effekte mit echten einzelnen Photonen. So lässt sich beispielsweise die Fähigkeit zur

Interferenz einzelner Photonen mithilfe eines Michelson-Interferometers und dessen Erweiterung zu einem Einzelphotonen-Quantenradierer realisieren.

Da solche Experimente im Schulunterricht lediglich über Analogieexperimente mit klassischem Licht oder Simulationen realisiert werden können, bietet dieses Demonstrationsexperiment einen echten Mehrwert für die Teilnehmenden.

5.2. Experimente zur Photonenstatistik

Um die drei in Kurs Q1.3 erwähnten Arten von Lichtquellen nachzuweisen, eignet sich das Quantenoptik-Kit von Thorlabs ebenfalls sehr gut. Mit dem Aufbau nach Grangier, Roger und Aspect [7] lässt sich die Dreifach-Koinzidenz einer Einzelphotonenquelle messen und die $g^{(2)}$ -Funktion bestimmen.

Ein abgeschwächter Laser bietet sich in einem simplen HBT-Setup an, um ein Beispiel einer kohärenten Lichtquelle anzuführen.

Zuletzt wurde vor kurzem ein Experiment entworfen, mithilfe dessen der Bunching-Charakter einer thermischen Lichtquelle nachgewiesen werden kann. Dies rundet die Experimentierreihe zur Photonenstatistik ab.

5.3. Anwendungsmöglichkeiten von Einzelphotonenquellen: Quantenschlüsselaustausch mit dem BB84-Protokoll

Um den Lehrkräften eine Motivation dafür zu geben, wofür die Erzeugung einzelner Photonen überhaupt notwendig ist, wird der Quantenschlüsselaustausch basierend auf dem BB84-Protokoll anhand eines Analogieexperimentes näher erläutert.

Das BB84-Protokoll bietet sich in diesem Kontext insbesondere deshalb an, da es zum größten Teil mit grundlegenden quantenphysikalischen Prinzipien, welche in der Schule unterrichtet werden, erklärbar ist.

Im Rahmen der Präsenzveranstaltung wird ein selbstentwickelter Aufbau mithilfe von Materialien der Firma Thorlabs präsentiert, mithilfe dessen der Quantenschlüsselaustausch durchgeführt werden kann. Ein Foto des hier verwendeten Versuchsaufbaus ist in Abbildung 5 zu sehen.

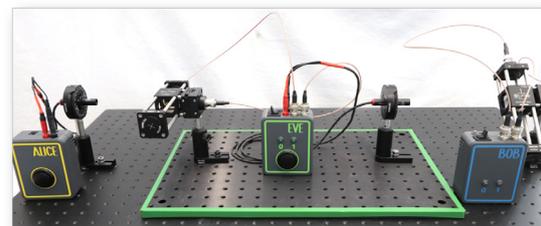


Abb. 5: Fotografie des Versuchsaufbaus des Analogieexperimentes zum Quantenschlüsselaustausch basierend auf dem BB84-Protokoll. Eigene Fotografie.

Zusätzlich bietet es sich an, im Rahmen der Lehrerfortbildung eine Low-Cost-Variante für die

Schule vorzustellen. So eignet sich beispielsweise das modulare Set der Projekts O3Q, welches unmittelbar in der Schule als Schülerexperiment eingesetzt werden kann [8].

6. Ausblick

Die im Rahmen dieses Beitrags vorgestellten Fortbildungsinhalte wurden bereits mehrfach an unterschiedlichen Lehrkräften in Thüringen und Baden-Württemberg getestet und daraufhin optimiert. Weitere Erprobungen sind im Verlauf dieses Jahres geplant und werden zeitnah umgesetzt.

Die Weiterentwicklung und Verbesserung des Online-Kurses auf der Lernplattform Moodle steht dabei an oberster Stelle. Der Online-Kurs wird planmäßig im Herbst 2025 auf der Online-Plattform „MINT Campus“ des Stifterverbands [9] deutschlandweit öffentlich zugänglich sein, sodass eine möglichst breite Masse an Lehrkräften angesprochen wird und Zugang zu den Inhalten hat.

7. Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde zunächst ein neues Fortbildungskonzept im Blended-Learning-Ansatz vorgestellt, welches durch Selbststudiums-, Online- und Präsenzphasen geprägt ist. Materialien für das Selbststudium wurde in Form von interaktiven H5P-Dateien in einem Moodle-Kurs aufbereitet. In diesem Moodle-Kurs sind auch Unterrichtsmaterialien bereitgestellt, welche von den Lehrkräften unmittelbar für ihren eigenen Unterricht eingesetzt werden dürfen.

Der Fokus dieses Beitrags lag auf der Entwicklung von Materialien rund um das Thema der Koinzidenzmethode und der Erzeugung einzelner Photonen. So wurden Moodle-Kurse zu den Themen der Koinzidenzmethode, Einzelphotonendetektion, Photonenstatistik und Erzeugung einzelner Photonen vorgestellt. Die Umsetzung dieser Themen in der Präsenzveranstaltung wurde ebenfalls thematisiert. So werden hier Experimente mit echten Einzelphotonen gezeigt, sowie eine Anwendungsmöglichkeit von einzelnen Photonen basierend auf dem Quantenschlüsselaustausch mit dem BB84-Protokoll vorgestellt.

Das Fortbildungskonzept wird im Laufe des Jahres erprobt werden und der Moodle-Kurs soll im Herbst auf der Website des „MINT-Campus“ des Stifterverbands publiziert werden.

8. Literatur

- [1] Bildungsstandards im Fach Physik für die allgemeine Hochschulreife. Beschluss der Kultusministerkonferenz vom 18.06.2020: https://www.kmk.org/fileadmin/veroeffentlichungen_beschluesse/2020/2020_06_18-BildungsstandardsAHR_Physik.pdf (Stand: 4/2025)

- [2] Aehle, S.; Kappl, K.; Scheiger, P. (2025): Praxisorientiertes Fortbildungskonzept mit Selbstlerneinheiten zur Quantenphysik – Fokus auf die Wesenszüge der Quantenphysik und Analogiemodelle. In: PhyDid B, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung, 1 (2025)
- [3] Kimble, H. J.; Dagenais, M.; Mandel, L. (1977): Photon Antibunching in Resonance Fluorescence. In: Phys. Rev. Lett., 39, S. 691-695, Url: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.39.691> (Stand 4/2025)
- [4] Kurtsiefer, C.; Mayer, S.; Zarda, P.; Weinfurter, H. (2000): Stable Solid-State Source of Single Photons. In: Phys. Rev. Lett., 85, S. 290-293, Url: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.85.290> (Stand: 4/2025)
- [5] Michler, P.; Kiraz, A.; Becher, C.; Schoenfeld, W. V.; Petroff, P. M.; Zhang, L.; Hu, E.; Imamoglu, A. (2000): A Quantum Dot Single-Photon Turnstile Device. In: Science, 290, S. 2282-2285, Url: <https://www.science.org/doi/epdf/10.1126/science.290.5500.2282> (Stand: 4/2025)
- [6] Quantenoptik-Kit der Firma Thorlabs: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?object-group_id=15827 (Stand: 4/2025)
- [7] Grangier, P.; Roger, G.; Aspect, A. (1985): Experimental Evidence for a Photon Anticorrelation Effect on a Beam Splitter: A New Light on Single-Photon Interferences. In: Europhysics Letters, 1, S. 173-179, Url: <https://iopscience.iop.org/article/10.1209/0295-5075/1/4/004/pdf> (Stand: 4/2025)
- [8] Modulares System von O3Q zum BB84-Protokoll: <https://o3q.de/bb84/> (Stand: 5/2025)
- [9] Website des MINT-Campus des Stifterverbands: <https://mintcampus.org/> (Stand: 5/2025)

Von den Anfängen zur Anwendung: 5 Jahre Competence Framework for Quantum Technologies

Franziska Greinert*, Rainer Müller*

*Technische Universität Braunschweig, Institut für Fachdidaktik der Naturwissenschaften
f.greinert@tu-braunschweig.de

Kurzfassung

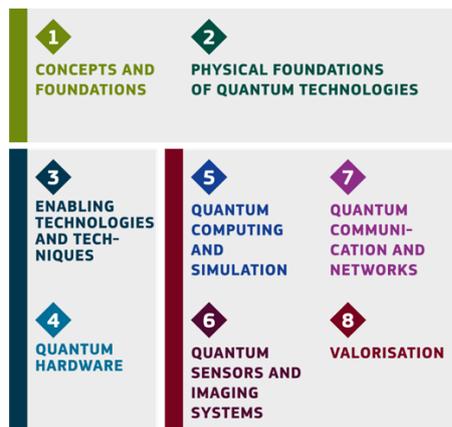
Das European Competence Framework for Quantum Technologies (CFQT) ist der europäische Referenzrahmen zur Standardisierung der Quantentechnologie-Bildung. Es bietet eine gemeinsame Sprache zu Themen und Konzepten rund um Quantentechnologien mit Beschreibungen von Kompetenzleveln, strukturiert in der Content Map und dem Proficiency Triangle. Zusätzlich werden in den sogenannten Qualification Profiles typische Qualifikationen aufgezeigt, die für die Arbeit im Quantentechnologie-Kontext relevant sind. So kann das CFQT etwa für die Definition von Lernzielen, die Planung von Bildungsangeboten oder den Vergleich von Qualifikationen genutzt werden. Das CFQT basiert im Wesentlichen auf zwei Studien: einer iterativen Fragebogenstudie in Anlehnung an die Delphi-Methode (2020/2021) und der Analyse von 34 Interviews mit Fachkräften aus der Industrie (2023). Diskutiert werden die Einflüsse dieser Studien auf das CFQT bzw. die drei Teile des CFQT (Content Map, Proficiency Triangle und Qualification Profiles) sowie Anwendungsfälle des CFQT in Deutschland, der EU und weltweit.

1. Das CFQT

Das European Competence Framework for Quantum Technologies (CFQT) [1, 2] ist der Referenzrahmen zur Beschreibung, Planung und zum Vergleich von Kompetenzen, Bildungsangeboten und Qualifikationsprofilen im Bereich der Quantentechnologien. Ziel ist die Etablierung einer gemeinsamen Sprache und Struktur für die Aus- und Weiterbildung sowie

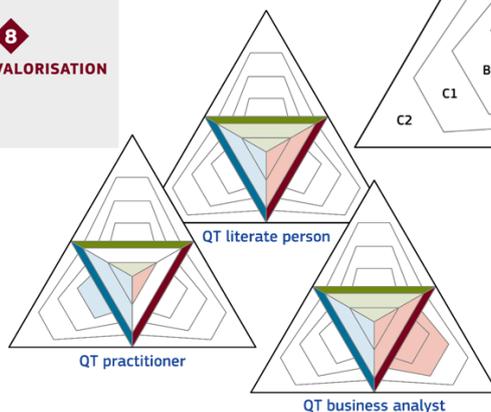
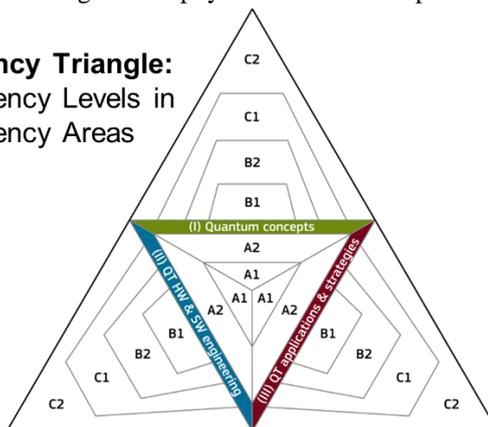
für die Personalentwicklung im Bereich der Quantentechnologien und der zugehörigen, aktuell entstehenden Industrie. Das CFQT besteht aus drei zentralen Bestandteilen (s. Abb. 1):

- a) Content Map: Acht „Content Domains“ mit insgesamt 42 Subdomains decken das gesamte Spektrum der Quantentechnologien ab, von Grundlagen und physikalischen Prinzipien über



Content Map:
inhaltliche
Strukturierung

Proficiency Triangle:
6 Proficiency Levels in
3 Proficiency Areas



Qualification Profiles:
neun prototypische
Qualifikationen für die
Industrie

Abb. 1: Komponenten im CFQT (eigene Darstellung mit Elementen aus dem CFQT [1, 2]).

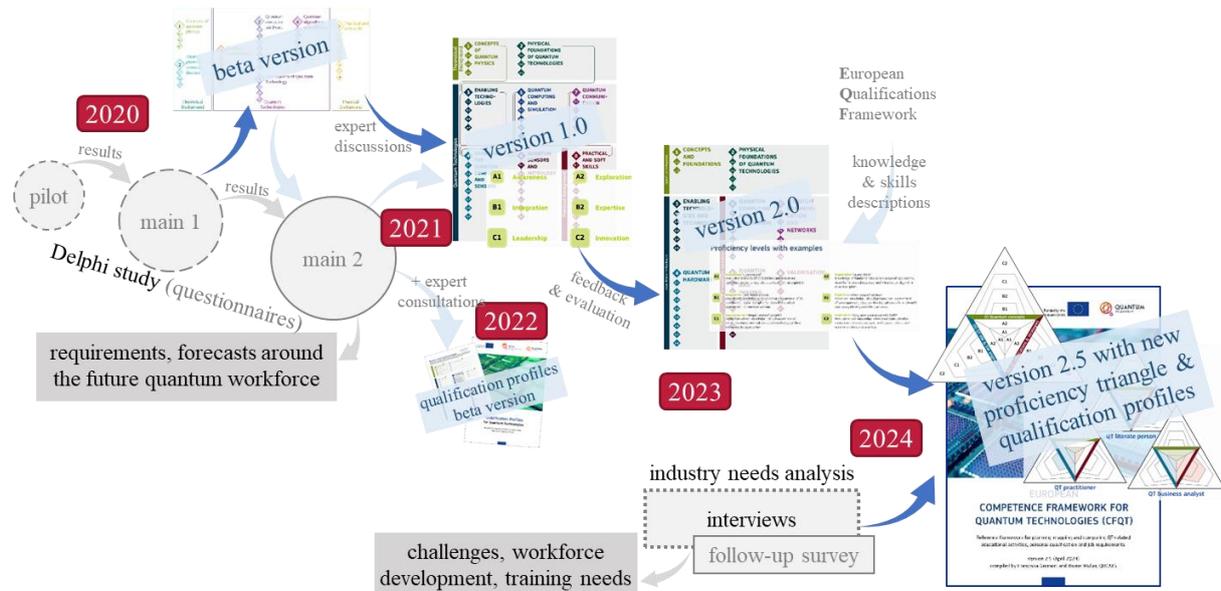


Abb. 2: Überblick über die 5 Jahre Entwicklung des CFQT (eigene Darstellung mit Elementen aus verschiedenen CFQT-Versionen [1, 2]).

Enabling Technologies und Quanten-Hardware, hin zu den drei Bereichen Quantencomputing, Quantenkommunikation und Quantensensorik und zugehörige Anwendungen, sowie wirtschaftlichen Aspekten und dem Impact der Quantentechnologien.

- Proficiency Triangle: Darstellung der sechs Profizienzebenen für die drei Profizienzebenen, das die Tiefe und Breite der erworbenen Fähigkeiten vergleichbar visualisiert. Die Profizienzebenen sind beschrieben auf Basis von Wissen und Fähigkeiten (Knowledge und Skills).
- Qualification Profiles: Neun prototypische Qualifikationsprofile bilden die typische Rollen und Karrierewege im Quantenbereich ab, inklusive beispielhafter Personas, empfohlener Ausbildungswege und benötigter Kompetenzen.

Das CFQT unterstützt die Entwicklung zielgerichteter Bildungsangebote, die Orientierung bei der Karriereplanung und die Standardisierung von Qualifikationen von und Anforderungen an Fachkräfte. Es wurde im Rahmen der Europäischen „Quantum Flagship“ Initiative entwickelt und vom Publications Office der Europäischen Union heraus gegeben.

2. Entwicklung des CFQT

Die Entwicklung des CFQT erfolgte iterativ, im Wesentlichen basierend auf zwei umfangreichen empirischen Studien mit Teilnehmenden aus Europa sowie die regelmäßige Sammlung von Rückmeldungen aus der Quantum Education Community und Konsultation von weiteren Experten (s. Abb. 2).

2.1. Delphi Studie

In einer dreistufigen Umfrage wurden Anforderungen, Kompetenzen und Prognosen für die zukünftige Quantum Workforce erhoben, mit insgesamt 188

Antworten. Diese Studie bildete die Grundlage für die erste Version des CFQT, wie in Ref. [3] beschrieben. Die Entwicklung der initialen Content Map ist auch in einem Tagungsbeitrag von 2021 [4] dokumentiert.

2.2. Interview-basierte Industriebedarfsanalyse

Aufbauend auf der ersten Studie wurden 34 Interviews mit Fachkräften aus der Industrie geführt, um konkrete Qualifikations- und Trainingsbedarfe, bevorzugte Lernformate und Herausforderungen bei der Personalentwicklung zu identifizieren. Ergebnisse aus den Interviews wurden durch einen Nachbefragungsfragebogen validiert. Die Studie ist in Ref. [5] publiziert. Die Erkenntnisse flossen direkt in Version 2.5 des CFQT ein: Die zentralen benötigten Kompetenzen spiegeln sich in den Beschreibungen der Profizienzebenen wider, während die in den Interviews diskutierten Rollen in den neun prototypischen Qualifikationsprofilen abgebildet sind.

3. Neu in 2025: Zertifizierungsschema

Mit Version 3.0 (April 2025) wurde das CFQT um ein „Certification Scheme for Quantum Technology Proficiency“ [6] erweitert. In diesem werden die im CFQT beschriebenen Profizienzebenen durch konkrete Angaben zu den zugehörigen Anforderungen besser messbar und vergleichbar. Das Schema beinhaltet typische Aufgabentypen und konkrete Beispielaufgaben für die unteren Profizienzebenen. So wird illustriert, wie Wissen und Fähigkeiten praktisch nachgewiesen werden können. Für die höheren Stufen werden typische Qualifikationsarbeiten beschrieben – von typischen universitären Abschlussarbeiten bis hin zu strategischen Analysen. So unterstützt es Lehrende bei der Entwicklung von Kursen und Prüfungen und bietet Lernenden und Entscheidungsträgern Orientierung bei der Auswahl und Bewertung von Qualifikationen.

4. Anwendungen des CFQT

Das CFQT findet bereits in vielfältigen Kontexten Anwendung und bietet zahlreiche weitere Nutzungsmöglichkeiten, darunter:

- a) Planung und Vergleich von Bildungsangeboten: mit dem CFQT lassen sich Curricula strukturieren, Lernziele definieren und Studiengänge vergleichen. Die Content Map und die Proficiency Levels helfen, Angebote passgenau auf Zielgruppen zuzuschneiden, sowie Bedarfe und Redundanzen zu ermitteln.
- b) Karriereplanung und Selbstbewertung: Lernende und Berufstätige können ihre eigenen Kompetenzen anhand der erreichten Proficiency Levels und der abgedeckten Content Subdomains einschätzen, sowie – etwa in Anlehnung an die Qualification Profiles – Ziele definieren und sich auf dieser Basis gezielt weiterentwickeln.
- c) Bedarfe und Stellenausschreibungen: Unternehmen können – etwa mit Hilfe der Qualification Profiles – Bedarfe identifizieren, gezielt Anforderungen für Stellen formulieren und die Qualifikationen von Fachkräften vergleichen. So erleichtert das CFQT die Kommunikation zwischen Arbeitgebern und (potenziellen) Mitarbeitenden und ermöglicht einen gezielten Aufbau von kompetenten Teams.
- d) Standardisierung und Zertifizierung: Das neue Certification Scheme unterstützt die Entwicklung europaweit vergleichbarer Zertifikate. So wird die Anerkennung von Qualifikationen gefördert.
- e) Politik und Förderprogramme: Das CFQT dient als Referenzrahmen für die Entwicklung und Bewertung von Förderprogrammen und unterstützt die strategische Entwicklung der Quantum Workforce auf europäischer Ebene.

5. Fazit

Das CFQT ist ein zentrales Instrument zur Entwicklung einer zukunftsfähigen Quantum Workforce. Durch die Kombination aus inhaltlicher Breite, und Klarheit in den Anforderungen bietet es eine solide Grundlage für Bildung, Training und Personalentwicklung im Quantenbereich – in Europa und darüber hinaus. Die kontinuierliche Weiterentwicklung und die Einführung des Certification Scheme stärken die Rolle des CFQT als (europäischer) Referenzrahmen für Quanten-Kompetenzen.

Weitere Details finden sich in der Dissertationsschrift *Towards the standardization of quantum technology education: Continuous analysis of quantum workforce requirements and related educational needs, and compilation of the European Competence Framework for Quantum Technologies* (F. Greinert, 2025, eingereicht).

6. Literatur

- [1] Greinert, F., Müller, R. (2025): European competence framework for quantum technologies (CFQT) – Reference framework for planning, mapping and comparing QT-related educational activities, personal qualification and job requirements. Herausgeber: European Commission: Directorate-General for Communications Networks, Content and Technology, Quantum Flagship. Publications Office of the European Union, 2025, DOI [10.2759/8917117](https://doi.org/10.2759/8917117)
- [2] Greinert, F., Müller, R.: European Competence Framework for Quantum Technologies (CFQT), Zenodo-Sammlung mit Versionen und ergänzenden Materialien, DOI [10.5281/zenodo.6834598](https://doi.org/10.5281/zenodo.6834598) (Stand: 05/2025)
- [3] Greinert, F., Müller, R., Bitzenbauer, P., Ubben, M. S., Weber, K.-A. (2023): Future quantum workforce: Competences, requirements, and forecasts. In: Phys. Rev. Phys. Educ. Res., 19 (2023), 010137, DOI [10.1103/PhysRevPhysEducRes.19.010137](https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.19.010137)
- [4] Gerke (VH Greinert), F., Müller, R., Bitzenbauer, P., Ubben, M. S., Weber, K.-A. (2021). Ermittlung von Anforderungen an künftige Quanten-Fachkräfte: Zwischenbericht aus der Delphi-Studie. PhyDid B virtuell, S. 495–500. <https://ojs.dpg-physik.de/index.php/phydid-b/article/view/1160> (Stand 5/2025)
- [5] Greinert, F., Ubben, M. S., Dogan, I. N., Hilfert-Rüppell, D., Müller, R. (2024): Advancing quantum technology workforce: industry insights into qualification and training needs. In: EPJ Quantum Technol., 11 (2024), 82, DOI [10.1140/epjqt/s40507-024-00294-2](https://doi.org/10.1140/epjqt/s40507-024-00294-2)
- [6] Greinert, F., Hilfert-Rüppel, D., Müller, R. (2025): Certification Scheme for Quantum Technology Proficiency. Zenodo, DOI [10.5281/zenodo.15210732](https://doi.org/10.5281/zenodo.15210732)

Förderung

This work is part of a project that has received funding from the *European Union's Horizon Europe research and innovation programme* under grant agreement No 101070193. 

This publication reflects only the views of the authors, the European Commission is not responsible for any use that may be made of the information it contains.

Zahllose didaktische Verbesserungsideen und dennoch bleibt alles beim Alten? - Workshop -

Barbara Obwaller^{1,4}, Stefan Brackertz^{2,4}, Annemarie Sich^{2,4}, Lisa Marie Lehmann^{3,4}, Simon Tautz⁴, Jonathan Moeller^{4,5}, Manuel Längle^{4,6}, Ayan Amalie Osman Mohamed⁵, Edwin Eobaldt⁷, Eva-Maria Odörfer⁶, Franz-Josef Schmitt⁸, Magdalena Micoloi⁹, Matti Wetzig⁵, Philipp Hell^{1,10}, Robert Wild¹¹

¹Universität Innsbruck, Studienvertretung Physik, ²Universität zu Köln, Fachschaft Physik, ³Nikhef, Amsterdam, ⁴Studienreform-Forum Physik, ⁵TU Dresden, Fachschaft Physik, ⁶Universität Wien, ⁷Friedrich-Schiller-Universität Jena, ⁸Martin-Luther-Universität, Halle-Wittenberg, ⁹Technische Universität Dresden, Didaktik der Physik, ¹⁰NTNU, Trondheim, ¹¹Universität Innsbruck

orga@studienreform-forum.de

Kurzfassung

Dieser Beitrag untersucht den Zusammenhang zwischen Studienregularien und Lehrveranstaltungsmodalitäten am Beispiel von (Vorrechnen-)Übungen in physikalischen Studiengängen. Es werden die Resultate von zwei Workshops sowie einem Call for Papers vorgestellt und systematisch interpretiert. Dabei wird zuerst aufgezeigt, welche Probleme das Format der Vorrechnen-Übung mit sich bringt. Anschließend werden die Struktur und die Ergebnisse des Workshops und der Beiträge vorgestellt. Anhand der Ergebnisse werden Lösungsvorschläge für Probleme aktueller Lehrveranstaltungsformate entwickelt und diskutiert. Der Beitrag schließt damit ab, welche Konsequenzen daraus für Studienreformen folgen und inwiefern ein Kulturwandel in der Vermittlung von didaktischen Konzepten für Fachphysiker:innen erfolgen muss.

Kernaspekte des Beitrags umfassen Ideen dazu, wie der Anteil an echter Lernzeit erhöht werden kann, indem Prüfungs- und Lernsituationen voneinander getrennt und Kontrollen reduziert werden. Zudem wird thematisiert, wie Feedbackschleifen sinnvoll in die universitäre Lehre eingebunden werden können. Abschließend werden Anschlusspunkte für weitere Forschung und folgende Wissenschaftskommunikation gegeben.

1. Problembeschreibung

(Hochschul-)Didaktische Erkenntnisse haben aus Sicht der Autor:innen in der Praxis jenseits von Best Practice- und Pilotprojekten oft wenig Konsequenzen auf die Art und Weise, wie langfristig gelehrt wird. Dies ist zum einen natürlich in den Rahmenbedingungen des Wissenschaftssystems, wie z.B. Kettenbefristung, Drittmittelabhängigkeit, dem (geringen) Stellenwert von Lehre v.a. im Bezug auf Geldvergaben, begründet, welche die grundsätzliche Herausforderung von Studienreformen darstellen.

Trotz dieser widrigen Bedingungen gibt es Ausbrüche aus dem Status Quo, welche das Studienreform-Forum Physik in der Vergangenheit schon dokumentierte [1].

Ausgehend von dieser Sammlung wurde dieses Jahr der Frage nachgegangen: Was ist die Ambition dieser Ausbrüche? Woher nehmen die Leute ihre Motivation und Ideen? Und was können wir daraus lernen?

Um Antworten auf diese Fragen zu erhalten, führte das Studienreform-Forum Physik einen Call for Papers [2] durch. Zusätzlich wurde auch explizit nach „Worst Practice“-Beispielen gefragt. Die eingesand-

ten Beiträge waren schlussendlich stärker auf letzteres fokussiert und streiften die übergeordnete Frage nur leicht. Anders als vielleicht erwartbar war das am häufigsten kritisierte und bearbeitete Format dabei nicht die Vorlesung, sondern die Vorrechnen-Übung. Deshalb sind wir diesem Format exemplarisch besonders nachgegangen.

Aus Verbreitungserhebungen [3] ist bekannt, dass die Vorrechnen-Übung in Deutschland und Österreich das Standard-Übungsformat ist, obwohl aus didaktischen Untersuchungen und Ableitungen klar ist, dass gerade diese Art der Übung weder die lernförderlichste noch die einzige Art ist, eine Übung zu halten. Hierauf soll in Abschnitt 2.1 kurz eingegangen werden.

Trotz dieser Erkenntnisse scheinen Übungsformate immer wieder zur Vorrechnen-Übung zu konvergieren. Zudem gibt es in Beiträgen des Studienreform-Forums (vgl. Beiträge [4], [5]) die Erfahrung, dass sich auch eindeutig positiv evaluierte Pilotprojekte nicht so verbreiten, wie das zunächst zu erwarten wäre. Vor dem Hintergrund stellt sich die Frage, ob ein systematischer Zusammenhang zwischen den Regelungen von Studien- und Prüfungsordnungen sowie Modulhandbüchern und einem hochschuldidakti-

schen Default-Zustand besteht. Diese Vermutung wird auch dadurch bestärkt, dass im Ausland bei anderen Regelungen andere Formate Standard sind (vgl. Beiträge [6], [7]).

Einerseits ist gerade angesichts der Rahmenbedingungen der Default der Veranstaltungen besonders dominant und es ist schwer davon abzuweichen, andererseits wird auch nach dem systematischen Aufbrechen der bisherigen Rahmenbedingungen der Zusammenhang zwischen den Regelungen und dem Default relevant sein.

Deshalb sind wir in einem Workshop bei der DPG-Frühjahrstagung in Göttingen mit knapp 40 Teilnehmer:innen, vorwiegend Lehrende aus Fachwissenschaft und Fachdidaktik, der Frage nachgegangen, ob und wie die Regelungen im Fachbereich den Default der Veranstaltungsgestaltung prägen. Der Workshop wurde in ähnlicher Größe bei der Bundesfachschaftentagung Physik (ZaPF) [8] mit in Fachschaften engagierten Physikstudierenden wiederholt.

Die Beiträge, die wir als Antworten auf unseren Call for Papers erhalten haben und die sich im supplementary material finden, und die Workshop-Ergebnisse geben zusammen wertvolle Denkanstöße, wie weitgehend unumstrittene didaktische Erkenntnisse für die Studienreform-Debatte neu fruchtbar gemacht werden können. Dies wird im Folgenden dargelegt.

2. Kritik an Vorrechen-Übungen

Die empirische Forschung zeigt, dass andere Formate als die klassische Vorrechen-Übung im fachlichen Test mit den Resultaten klassischer Methoden mithalten können und teilweise besser abschneiden (vgl. [9]). Zudem setzen dabei Formate wie die „Tutorials in Physics“ (vgl. [10], [11]) andere Schwerpunkte wie die kollaborativen Problemlösekompetenzen (vgl. Beitrag [12]). Dies liegt vor allem auch daran, dass Vorrechen-Übungen die folgenden strukturellen Probleme mit sich bringen (vgl. Beitrag [13]):

2.1. Abschreibeübungen – didaktische, lernpsychologische & motivationale Probleme

Aus Angst etwas zu verpassen, sind typischerweise fast alle Studierenden während Vorrechen-Übungen größtenteils damit beschäftigt, die präsentierten Lösungen vollständig von der Tafel abzuschreiben. So kommen sie nicht zum Mitdenken und die Vorrechen-Übung ist faktisch ein Diktat statt eine Lernmöglichkeit (vgl. Beitrag [14]). Die Lösungen sind dabei ausschließlich Vorbereitungsmittel für die Prüfung und die Übung dient der Lösungsbeschaffung. So kommt es, dass „die Übung von Bildung zu Ausbildung hinab[sinkt]“ (Beitrag [13]).

Das ist nicht nur aus didaktischer Sicht sondern auch aus motivationaler und lernpsychologischer Sicht nachteilig: Durch einen geringen Fokus auf Verständnis wird die Lernzeit nicht effizient genutzt, was unter anderem dazu führt, „dass viele Studierende ihre eigenen Fähigkeiten vor der Klausur nicht realistisch

einschätzen konnten“ (Beitrag [5]). Gleichzeitig führt bei Vorrechen-Übungen die hohe Fokussierung auf die jeweils vortragende Person dazu, dass die Motivation der Lernenden stark von dieser Person und sowohl ihrer Vortragsart als auch der Sinnhaftigkeit ihrer parallelen Erläuterungen abhängt (vgl. Beitrag [15]). Das kann sowohl positive als auch negative Folgen haben, Studierende können völlig mitgerissen oder komplett abgehängt werden. Mit größerem Anteil an der Übungszeit, in der Studierende selbst tätig sind (und nicht nur konsumieren, was an der Tafel geschieht), steigt dagegen nicht nur der Lerneffekt; viel mehr wird an Hand der Ergebnisse dieses Handelns überhaupt erst eine Relation zwischen eigenem Lernstand und dem, was in der Übung passiert, deutlich, sodass Studierende sich besser selbst einschätzen können und auch motivational stärker an den eigenen Lernfortschritt anknüpfen können (vgl. [16]).

2.2. Alles wird zur Prüfungssituation

Das wohl schwerwiegendste Problem mit den Vorrechen-Übungen ist jedoch die unzureichende Trennung von Prüfungs- und Lernsituationen, wenn Studierende mehr oder weniger gezwungen an der Tafel vorrechnen (vgl. Beitrag [17]):

Erstens unterscheiden sich Lern- und Testaufgaben grundlegend und verfolgen andere Zwecke in Bezug auf die Förderung von Kompetenzen, die Möglichkeit der Hilfestellung und die Anzahl an Lösungswegen.

Zweitens wirkt sich eine Verbindung der beiden Situationen negativ auf die Lernchancen aus, da der Druck der Prüfungssituation die Lernenden einschüchtert (vgl. [18]). Sie trauen sich nicht Fehler zu machen, obwohl die Übungen gerade dafür gemacht sein sollten, für das Üben. Wenn Studierende ihre Arbeit vorstellen, führt dies zudem bei den anderen Studierenden und teilweise auch bei Dozierenden dazu, dass sie nicht einhaken und nachfragen, weil sie die Präsentierenden nicht „in die Pfanne hauen“ oder „rausbringen“ wollen. Zahlreiche Einzelberichte (dem wäre empirisch nachzugehen) zeigen, dass dieses Problem so weit geht, dass Studierende, obwohl sie selbst Übungsaufgaben bearbeitet haben, nicht ihre eigene Ausarbeitung abgeben, sondern eine Abgeschriebene, weil sie ihre eigene für zu schlecht halten. Dies hat natürlich verheerende Folgen, weil dann sämtliches Feedback zur Abgabe vollkommen nutzlos ist und zudem die Übungsleiter:innen eine falsche Einschätzung davon bekommen, wo die Studierenden stehen und dementsprechend die Übungen an den Studierenden vorbei konzipieren.

Drittens ist aus der Lernpsychologie bekannt, dass Menschen in Prüfungssituationen unmittelbar vom Lern- in den Performance-Modus umschalten und nicht mehr aufnahmefähig sind (vgl. [19], [20]). Die Veranstaltungszeit ist aber eigentlich die wertvollste Lernzeit, weil hier den Studierenden sowohl die übrigen Studierenden als auch der didaktische und fachliche Vorsprung der Lehrenden zugute kommen kann.

3. Struktur der Workshops

Mittels der Workshops sollte die These untersucht werden, ob und wie stark sich der Inhalt von Fachbereichsregelungen¹ auf die tatsächliche Lehr(veranstaltungs)gestaltung auswirkt. Kann eine geschickte Formulierung der Fachbereichsregelungen dafür sorgen, dass das Vorrechnen didaktisch wertvolleren Konzepten weicht?

Zur Klärung dieser Frage wurden die Workshop-Teilnehmer:innen in vier Gruppen aufgeteilt, wobei jede davon eine andere Regelung erhielt. Anhand dieser sollten die Teilnehmer:innen eine Lehrveranstaltung konzipieren. Dabei sollten sie zwei typisch anzutreffende Perspektiven einnehmen: Einerseits die einer Person mit wenig didaktischer Ausbildung bzw. geringem Interesse, die sich am Status Quo orientiert und dadurch ihren Arbeitsaufwand minimieren möchte, andererseits die einer didaktisch ambitionierten Person, die an die gegenwärtigen Rahmenbedingungen des Wissenschaftssystems gebunden sind, also einem hohen Konkurrenzdruck unterliegt, und dadurch viele weitere Verpflichtungen hat, was zu wenig Zeit für Lehre und Lehrkonzeption führt.

Wie in der Problembeschreibung motiviert fokussierte sich die Diskussion in den Workshops auf Übungskonzepte, welche eine Grundvorlesung begleiten. Jedes dieser Konzepte musste eine Leistungserbringung beinhalten, die Voraussetzung für eine (Modul-)Prüfung oder auch zur eigenständigen Benotung der Übung selbst sein könnte.

Die diskutierten Regelungen werden im Folgenden kurz aufgeführt:

Regelung 1:

- Die Note bzw. das Bestehen der Übungen setzt sich aus mindestens 4 Teilleistungen (mit jeweils einer Note) zusammen
- Keine Teilleistung kann allein über das Nichtbestehen entscheiden
- Dozierende können entscheiden, ob es Bonuspunkte gibt

Regelung 2:

- Das Bestehen der Übungen fordert, dass min. 50% der Übungsaufgaben richtig abgegeben werden
- Es sollen 3x im Semester Aufgaben vorgerechnet werden

Regelung 3:

- Als Leistung zählt, wenn Studierende vorweisen können, sich aktiv mit dem Übungsstoff beschäftigt zu haben
- Es muss mehr als eine Form geben, die aktive Beschäftigung nachweisen zu können Bsp.: Einsen-

den von Fragen 24h vor der Übung, Musterlösung von Studierenden für Studierende

Regelung 4:

- Die Leistung besteht darin, die Abgaben anderer (mit Hilfe einer Musterlösung) zu korrigieren.

4. Erkenntnisse aus den Workshops

Die spontan erarbeiteten Ergebnisse der Arbeitsgruppen in den Workshops hingen sehr an der Zusammensetzung der konkreten Gruppen. In beiden Durchläufen des Workshops wurde durchaus deutlich, dass die Regelungen der Studiengänge erhebliche hochschuldidaktische Konsequenzen haben. Wobei sich auch ohne die Ergebnisse der Workshops naheliegende Zusammenhänge von Studiengangsregelungen und hochschuldidaktischer Praxis vermuten lassen, drängen sie sich angesichts der Befunde aus den Workshops mit großer Dringlichkeit auf.

Bezugspunkt dieser Überlegungen sind dabei die folgenden Erkenntnisse bzw. Zielsetzungen der allgemeinen Didaktik:

1. Lern- und Prüfsituationen sind zu trennen.

Aus der Lernpsychologie ist bekannt (vgl. [19], [20]), dass Lernen in Prüfungssituationen nicht funktioniert und dass bei einer Durchmischung, selbst wenn der Schwerpunkt bei der Lernsituation liegt, psychologisch immer die Prüfungssituation dominiert und faktisch Lernen nicht stattfindet, wenn eine Prüfungssituation mitschwingt.

2. Lernveranstaltungen sollen aktivierend sein.

Ebenfalls aus der Lernpsychologie ist bekannt (vgl. [21], [22], [24]), dass Lernen ein aktiver Prozess ist und Lehrveranstaltungen explizit darauf gerichtet sein sollten, dass Studierende selbst aktiv werden und nicht nur zuhören oder mitschreiben.

3. Mit Feedback sollte systematisch gearbeitet werden.

Dementsprechend ist Feedback besonders wirksam, wenn es nicht nur zur Kenntnis genommen und eventuell in der Zukunft berücksichtigt wird, sondern wenn es explizit in das Lehrkonzept einbezogen wird.

4. Die Lehre soll systematisch Problem- statt Blufforientierung fördern.

Eine tradierte Kritik am Unilehrbetrieb ist (z.B. [25]), dass die Lehrformate Bluff und Schaumschlägerei fördern, wenn sie vor allem darauf gerichtet sind, Erkenntnisse vorzustellen (und dabei über Unklarheiten hinwegzugehen), anstatt offene Fragen, Widersprüche oder Unverstandenes zu adressieren.

5. Die Weiterentwicklung der Lehre sollte die Mental-Health-Situation ent- und nicht verschärfen.

Nachgewiesenermaßen ist die Mental-Health-Lage von Studierenden fächerübergreifend schlechter als in anderen gesellschaftlichen Bereichen (vgl. [26]). Hauptgründe dafür sind die Finanzlage und Dauerprüfungsstress. Dementsprechend sollten Weiterentwicklungen der Lehre darauf gerichtet sein, Prü-

¹ Hiermit sind Regelungen zu Modulen, Veranstaltungen, Prüfungen etc. gemeint, die an verschiedenen Stellen wie Studienordnungen, Prüfungsordnungen und Modulhandbüchern auftauchen.

fungsstress abzubauen und Kompatibilität mit Nebenjobs herzustellen.

4.1. Schert sich jemand um die Regeln?

Die Dozierenden, die am ersten Workshop-Durchlauf teilnahmen, haben zu großen Teilen betont, dass sie die Regelungen ihres Fachbereichs nicht kennen und auch nicht vorhaben, sich jemals damit zu beschäftigen. Alles ergebe sich aus der Tradierung der Fachbereiche, die sich weitgehend unabhängig von den Regelungen entwickelte. Vor dem Hintergrund wurde massiv infrage gestellt, ob es sich überhaupt lohne, über Regelungen zu diskutieren.

Dem wurde von Studierenden und Dozierenden, die in den relevanten Gremien aktiv sind, widersprochen: Allein schon weil sich Studierende beschwerten, wenn Dozierende die Regelungen des Fachbereichs nicht einhielten, würden Änderungen solcher Regelungen durchgesetzt, wenn auch oft zeitlich verzögert. Somit seien die Regelungen auch dann relevante Eckpunkte für die Weiterentwicklung der Tradierungen der Fachbereiche, wenn sich die Mehrheit der Dozierenden weigere, sich mit diesen Regelungen auseinanderzusetzen.

4.2. Sinnvolle Veranstaltungen lassen sich nicht durch Regeln herbeiführen

Es gibt zahlreiche Best Practice-Beispiele, bei denen Ausarbeitungen von Studierenden im Peer-Verfahren korrigiert oder bearbeitet werden (vgl. Beitrag [4],[5], und [27]). Regelung 4 ist davon inspiriert und zielt darauf ab, dass Dozierende solche Formate auswählen.

In beiden Workshop-Durchläufen wurde allerdings von Beispielen berichtet, wie diese Idee – anscheinend meist um Arbeit zu sparen – offensichtlich wenig sinnvoll realisiert wurde.

Vor dem Hintergrund solcher Erfahrungen ist klar, dass Regelungen, wie sie hier betrachtet werden, hochschuldidaktische Schulungen und Diskussionen im Fachbereich (vgl. [28]) und vor allem Ambitionen nicht ersetzen können, was nicht bedeutet, dass sie keine Relevanz hätten.

4.3. Regelungen stehen oft im Weg

Es gibt Vorschriften, die hochschuldidaktischen Ungehorsam erfordern, soll eine Veranstaltung sinnvoll sein. In den Beiträgen und den Workshops wird immer wieder ein Beispiel diskutiert: Vorrechen-Pflicht. Besteht eine Vorrechen-Pflicht, ist der zeitsparendste Weg, diese in der Übung selbst zu realisieren. Dies kostet aber so viel Zeit, dass kaum Raum für Anderes bleibt, und die damit blockierte Zeit geprägt ist von einer Durchmischung von Lern- und Prüfsituation, in der also faktisch nicht gelernt werden kann.

4.4. Nutzung der Veranstaltungen als Lernzeit

Nach Beobachtung der Autor:innen sowohl in den Workshops als auch auf Grund von Erfahrungsberichten zahlreicher Fachschaften, tendieren Dozierende

de dazu, alle in den Regularien festgelegten Leistungen auch kontrollieren zu wollen. Mehrere Workshop-Teilnehmer:innen betonten, dass dies ein Ergebnis der Umstellung auf das BaMa-System sei, in Diplomzeiten hätten sie nie irgendwas kontrolliert, aber jetzt empfänden auch sie die Notwendigkeit dazu. Grund sei, dass die Gesamtzusammenhänge auf Grund der Modularisierung der Studiengänge so sehr aus dem Blick geraten seien, dass es bei der Mehrheit der Studierenden unrealistisch sei, dass sie selbst den Sinn einer Aufgabe erkennen und sich dann ohne „Überwachung“ ans Werk machten.

Inwiefern diese These auf alle Physik-Fachbereiche zutrifft, wäre empirisch zu untersuchen, was insbesondere für den Zusammenhang mit der BaMa-Umstellung eine Herausforderung sein dürfte.

Unabhängig davon, ob diese These überall zutrifft, ist aber klar, dass es dieses Kontrollbedürfnis an so vielen Orten gibt, dass es relevant ist.

Wenn nun also die Haltung der Dozierenden oder der Diskurs vor Ort dahin gehen, dass in den Regularien festgelegte Leistungen zumindest auch stichprobenartig kontrolliert werden müssen, hat das in der Praxis oft zwei weitreichende, den gesamten Lehrbetrieb dominierende, problematische Folgen:

1. Alles, was außerhalb der Veranstaltung selbst stattfindet, kann schlecht auf Abschreiben etc. kontrolliert werden. Deshalb tendieren Dozierende, auch ohne dass etwa ein Vorrechnen fest in den Regeln stünde, dazu, mit solchen Methoden zu kontrollieren, ob Studierende Übungszettel selbst gerechnet bzw. tatsächlich verstanden haben, sodass am Ende kaum noch Lernzeit übrig bleibt.
2. Oft ist es üblich, dass die Leistungskontrollen, die in den Veranstaltungen stattfinden, stichprobenartig sind. So müssen etwa bei den sog. Kreuzerl-Übungen Studierende ankreuzen, welche Übungsaufgaben sie bearbeitet haben und werden dann spontan an die Tafel „gebeten“ um die Aufgabe vorzurechnen, die sie angekreuzt haben. Solche Systeme beruhen auf dem Überraschungseffekt und sind hochschuldidaktisch hochgradig problematisch: (1) Offensichtlich verursacht dieses System Dauerstress, innerhalb und außerhalb der Veranstaltung, der bekanntermaßen eine Lernblockade ist (vgl. [29]). (2) Dies gilt umso mehr, da eine entscheidende Einstiegschürde des Physikstudiums die Stoffmenge ist. Die Hauptumstellung gerade für Studierende, die in der Schule gute Noten hatten, besteht zu Beginn des Studiums darin, dass die in den Veranstaltungen behandelte Stoffmenge anders als in der Schule überhaupt nicht synchron mit den Veranstaltungen zu bewältigen ist (vgl. [30]). Studierende müssen daher lernen, dass das nicht ihr Versagen, sondern so gedacht ist und wie es gelingt, sich im Unverstandenen so zu orientieren, dass sie die Prioritäten auf die entscheidenden

den Stellen legen und nicht den Überblick verlieren. (3) Die Überraschungspräsentation fördert zudem in besonderer Weise die bereits problematisierte Bluff-Orientierung, indem sie Studierende dazu verleitet Übungen anzukreuzen, die sie gar nicht gemacht haben.

Hochschuldidaktisch wurden in den Beiträgen und in den Workshops im Wesentlichen folgende Ansätze diskutiert, um dieses Problem zu beantworten:

1. Präsenzlernen

Anstatt die Veranstaltungszeit dafür zu verwenden, zu kontrollieren, ob außerhalb der Veranstaltung gelernt wurde, kann man auch während der Veranstaltung lernen. Gerade Lernzeit mit Unterstützung durch Tutor:innen verspricht große Lernfortschritte (vgl. [31]). Dazu wird in der Veranstaltungskonzeption oft die Lernzeit außerhalb der Veranstaltungen zugunsten von längeren Veranstaltungszeiten reduziert. Ein Problem dieser Ansätze ist allerdings, dass sie oft mit einer mehr oder weniger expliziten Anwesenheitspflicht einher gehen, wenn das Kontrollbedürfnis der Dozierenden nicht überwunden ist, was insbesondere für Studierende in prekärer sozialer Lage ein Problem darstellt, das durch eine Verlängerung der Veranstaltungszeit noch gesteigert wird. Zudem werden Studierende weniger herausgefordert, zu lernen, wie sie ihre Zeit selbst einteilen, wenn dies durch das Veranstaltungsformat schon vorgegeben ist.

2. Reduktion der Kontrollen

Es gibt durchaus auch Dozierende, die die Kontrollen reduzieren oder ganz darauf verzichten. Die Philosophie dahinter lässt sich angesichts der Debatten in den Workshops zusammenfassen als: (1) Es ist ein entscheidender Teil des Studiums, dass man lernt, sinnvoll mit Freiheiten umzugehen und das lässt sich nicht theoretisch oder „im Sandkasten“ lernen, sondern nur wenn es die Möglichkeit gibt, tatsächlich hinzufallen, also z.B. eine Klausur nicht zu bestehen. Radikaler noch: Studierende aus einem Studiengang mit zu vielen Leitplanken, deren Einhalten permanent kontrolliert wird, können das, was einen universitären Abschluss eigentlich ausmacht, gar nicht lernen, selbst wenn sie am Ende Physik können, und „sollten dementsprechend auch eigentlich keinen Abschluss bekommen.“ (2) Damit Studierende aus dem Fallen lernen, muss der Boden weich sein und es ist entscheidend, dass das Umfeld nicht nachtritt, sondern die Hand zum Wiederaufstehen reicht. Dementsprechend ist dieser Ansatz, soll er zur Entwicklung der Studierenden beitragen, anstatt sie zu verheizen, auf ein entsprechendes Umfeld angewiesen: (a) Keine Prüfungsversuchsrestriktionen. (b) Gute Voraussetzungen für Bafög-Verlängerungen und hohe Kompatibilität des Studiengangs mit Nebenjobs. (c) Ein soziales Gefüge im Fachbereich, das Studierende nicht vereinzelt lässt sowie von Wohlwollen und Kooperation statt Missgunst und Konkurrenz geprägt ist.

3. Feedback-Loops schließen

Ein weiterer Ansatz ist die Etablierung von Formaten, die mit weniger Teilleistungen arbeiten, die dafür aber in einem iterativen Prozess entstehen. Werden beispielsweise nicht wöchentlich, sondern nur alle zwei Wochen Übungen abgegeben und sind diese Übungen anhand des Feedbacks der Dozierenden zu überarbeiten, ist durch den Schritt der Überarbeitung die „Abschreibefahr“ massiv reduziert. Dies gilt umso mehr, wenn das Feedback nicht nur im Auftrag besteht, bestimmte Fehler zu korrigieren, sondern die Abgabe (auch wenn sie komplett fehlerfrei ist) als Ganze weiterzuentwickeln; so können etwa bei mehreren sehr ähnlichen Abgaben verschiedene Überarbeitungsaufträge gegeben werden. Dieser Ansatz ist viel weitreichender als nur eine Kontrolle der Studierenden, ohne dabei die Veranstaltungszeit zu „verstopfen“ oder mit „Überraschungen“ zu stressen: (1) Er zielt systematisch darauf ab, dass mit Feedback auch tatsächlich gearbeitet wird. (2) Das Schließen der Feedback-Loops ist auch eine didaktische Unterstützung der Dozierenden, weil sie anhand der Überarbeitungen der Studierenden z.B. lernen, wann ihr Feedback hilfreich ist und wann irreführend. Zudem sorgt es dafür, dass Dozierende weniger über „gerechte Bewertung“ nachdenken und mehr darüber, was Studierenden beim Lernen weiterhilft.

4.5. Weiterentwicklungen fördern

In den Workshops wurde immer wieder berichtet und diskutiert, dass es fruchtbar ist, wenn nicht genau festgelegt ist, wie Leistungen zu erbringen sind, aber festgelegt ist, dass es auf verschiedene Arten möglich sein muss. Dies – so die Erfahrung – führe dazu, dass sich verstärkt von Dozierenden wie von Studierenden Gedanken darüber gemacht würden, welche praktischen Konsequenzen solche Entscheidungen haben und die Veranstaltungen von allen Beteiligten bewusster gestaltet würden. Zudem seien so die Hürden geringer, Neues auszuprobieren.

5. Konsequenzen für Studienreformen

Aus der Studienlage und aus den auf unseren Call for Papers eingegangenen Beiträgen zeigt sich erhebliches Verbesserungspotenzial allein schon dadurch, dass man das klassische Vorrechnen in Übungen weglässt. Entsprechend früherer Beiträge (z.B. [14]) gibt es dafür zwei entscheidende Voraussetzungen:

1. Musterlösungen für Übungsaufgaben müssen zum richtigen Zeitpunkt veröffentlicht werden.
2. Es darf nicht weiter nahegelegt werden, dass die Veranstaltungszeit zum Kontrollieren verwendet wird.

Zur Frage, wie die zweite Voraussetzung geschaffen werden kann, und zwar nicht nur in Bezug auf das Vorrechnen in Übungen, lassen sich aus den Erkenntnissen aus den Workshops einige konkrete Schlussfolgerungen für Prüfungsordnungen und andere Regularien ableiten:

5.1. Fokus der Entwicklung von Regularien

Auch wenn sich die in diesem Beitrag diskutierten Regularien oft in Prüfungsordnungen finden, haben sie vor allem Auswirkungen auf die Lernsituation und sollten vor allem von ihren Auswirkungen darauf gedacht werden.

Entscheidend dabei ist, dass die Regularien nicht nur die Arbeitsweise und den Fokus der Studierenden maßgeblich prägen, sondern auch die Arbeitsweise und den Fokus der Lehrenden, und zwar umso mehr, je geringer deren hochschuldidaktische Kapazitäten sind.

5.2. Offenheit & Konkretheit von Prüfungs- und Studienordnungen

Angesichts relativ gesicherter empirischer Erkenntnisse (vgl. [10], [21], [32]), dass eine Vielfalt von Prüfungsformen und Lernmethoden förderlich und Routine problematisch ist, ist die einheitliche Festlegung von Studien- und Prüfungsformen didaktisch wenig überzeugend. Gleichzeitig ist sie vielerorts üblich, um Gerechtigkeit und Klarheit in Streitfällen sicher zu stellen.

Angesichts dieses Spannungsfeldes eröffnen die Erkenntnisse aus den Workshops eine naheliegende Konsequenz: Die Regularien legen eine bestimmte Form der Leistungserbringung fest und bestimmen zudem, dass Dozierende mindestens eine weitere Form der Leistungserbringung anbieten müssen, die die Studierenden alternativ wählen können, sodass Dozierende ermutigt werden, neue Konzepte auszuprobieren.

Offenheit und Freiheit bei den Lehrformaten bedeutet jedoch nicht Willkür. Es ist notwendig, dass sich Lehrende und Lernende Ziele setzen, um die Lehre und das Studium zu verbessern. Dabei kann das Ausprobieren von Lehrformaten selbst ein Ziel sein, um sich Gedanken um gute Lehre zu machen und in den Austausch zu kommen. Regelungen aller Art sollten nicht nur justiziable Eckpunkte sein, sondern auch die didaktische Konzeption festhalten.

5.3. Echte Lernzeit sicherstellen

Wichtiger als die Festlegung der Studien- und Prüfungsleistungen selbst ist es angesichts der Workshop-Ergebnisse festzulegen, ob diese kontrolliert werden und dass die Kontrolle so geschehen muss, dass in der Veranstaltung selbst keine Prüfungssituation entsteht, die alles andere aus dem Fokus drängt. Konkret kann das heißen:

- Punkte für abgegebene Übungen können nicht aberkannt werden, wenn man die Ergebnisse nicht in der Übung erklären/vorrechnen kann.
- Die Abgabe von Übungsaufgaben ist komplett freiwillig, aber wer was abgibt, bekommt auf Basis dessen einen persönlichen Lerntipp für die nächste Woche.
- Grundlage fürs Bestehen / die Benotung eines Vortrags ist nicht der Vortrag selbst, sondern ein

vorab eingeschicktes Vortragsvideo. Hierbei steht die Note schon fest, bevor der Vortrag in der Veranstaltung gehalten wird.

- Das Antestat eines Praktikums ist schon durch vorher eingesandte Ausarbeitungen oder Fragen bestanden und wenn man sich am Experiment trifft, kann man nicht mehr „ausfliegen“.

Oft, aber nicht immer fallen dabei „Leistungskontrolle“ und „Prüfungssituation“ zusammen. Das Lernen blockiert dabei die „Prüfungssituation“. Der Grund, warum Veranstaltungen von Lern- zu Prüfungssituationen umfunktioniert werden, ist dagegen in der Regel das Bedürfnis der „Leistungskontrolle“. Ein im Workshop mehrfach diskutiertes Beispiel dafür, dass beides – anders als beim Vorrechnen – nicht unbedingt zusammenfallen muss, ist die Korrektur von Abgaben durch andere Studierende in der Übung: Dies ist offensichtlich auch eine „Kontrolle“ der abgegebenen Aufgaben, aber dennoch sind die Studierenden dabei nicht in einer „Prüfungssituation“, sondern geben sich gegenseitig Feedback.

5.4. Feedback-Loops schließen

Bisher nur bei Praktikumsausarbeitungen verbreitet ist das Überarbeiten von Abgaben anhand von Feedback. Dieses Prinzip lässt sich aber auf fast alle Veranstaltungsformate und fast alle Arten von Studien- oder Prüfungsleistungen übertragen und bietet, wie sich in den Workshops gezeigt hat, viele strukturelle Vorteile. Diese treten besonders zutage, wenn es dabei anders als in vielen Praktika nicht ums „Fehler korrigieren“ geht, sondern breiter gefasst ums „Weiterentwickeln gemäß eines spezifischen Arbeitsauftrags“. Der erhöhte Aufwand der Überarbeitung für alle Beteiligten ist natürlich durch eine Reduktion der Anzahl der Abgaben zu kompensieren. Die Vermutung liegt nahe, dass durch die intensivere Beschäftigung mit dem Material, der Lernerfolg ähnlich hoch bleiben dürfte.

6. Ausblick

Im Workshop stellte sich auch heraus, dass manche der Fach-Physiker:innen in erster Linie zu Inspirationszwecken zum Workshop gekommen waren, d.h. sich der „zahllosen didaktische (Verbesserungs-)Ideen“ bis dato nicht bewusst waren. Auch die Erkenntnis, dass Vorrechnen-Übungen eine der schlechtestmöglichen Lehrmethoden sind, egal wie man sie auch umsetzt, war für viele überraschend. Längst bekannte Forschungsergebnisse der Didaktik scheinen also wenig zu den Lehrenden an den Universitäten durchzuschickern, obwohl offenbar Interesse und Offenheit für diese Fragen besteht.

Angesichts dessen ist eine Zielgruppen-orientierte Ausarbeitung und Umsetzung von Ideen, die fachgruppenübergreifend auf die Erkenntnisse der Hochschuldidaktik aufmerksam machen, wünschenswert. So können Ergebnisse der Didaktik beispielsweise praxisnah in den Kolloquien der Fachphysik kommuniziert werden und einen Kulturwandel anstoßen. Al-

lerdings liegt die Ausgestaltung der Lehre maßgeblich in der Hand von Professor:innen, Post-Docs bis hin zu fortgeschrittenen Studierenden, die im aktuellen Wissenschaftssystem schlechte Voraussetzungen dafür haben, sich maßgeblich hochschuldidaktisch zu bilden und hohen Aufwand in die Lehre zu stecken. Hochschuldidaktische Weiterentwicklungen können auch bei perfekter Kommunikation nicht daran vorbei implementiert werden; vielmehr müssen die Beweggründe und Einschränkungen verstanden und berücksichtigt werden, wenn Lehre verbessert und Studienreformen umgesetzt werden sollen. Dazu können und müssen auch Studierende beitragen, indem sie sich in den Diskurs sowohl über Regelungen des Fachbereichs und deren Einhaltung, aber auch in die aktive Gestaltung ihrer Veranstaltungen einmischen.

Auf der einen Seite steht dabei die Erkenntnis, dass verbesserte Regelungen zumindest die Voraussetzungen dafür verbessern können, trotz widriger Bedingungen, aus dem Trotz der entfremdeten und vielfach als sinnlos empfundenen Lehre auszubrechen und damit auch die Bedingungen dafür zu verbessern, das Wissenschaftssystem insgesamt zu reformieren, anstatt etwa die durch die Drittmittel-Orientierung geförderte Bluff-Kultur in der Lehre zu reproduzieren. Diese Erkenntnis sollte Anlass sein, solche Regelungen genauer, und vor allem von der Didaktik her zu beleuchten, anstatt sie vor allem unter juristischen Aspekten zu diskutieren. Dies gilt sowohl für die Hochschuldidaktik als auch die die Praktiker:innen der Studienreform in Gremien und Qualitätsmanagement.

Auf der anderen Seite gibt es nicht einfach ein von allen geteiltes Ziel, das nur an widrigen Bedingungen hakt. Hierzu sei auf den Workshop des Studienreform-Forums von 2024 verwiesen, bei dem sich herauskristallisierte, dass sich zumindest die teilnehmenden Lehramtsstudierenden im Vergleich zu ihren Fachstudium-Peers stark herab gesetzt sahen und von Seiten der Fach-Unterrichtenden die Forschung der Didaktik noch immer oft milde lächelnd abgetan bzw. als nicht relevant wahrgenommen wird (vgl. [33]). Auch sind sinnvolle Lehrveranstaltungen und die Überwindung der Entfremdung im Studium nicht zu machen, wenn das Verhindern von „Durchschummeln“ im Fokus der Gestaltung der Lehre liegt und Probleme aller Arten reflexartig mit Restriktionen und mehr Kontroll-Orientierung beantwortet werden, anstatt an die Wurzeln der Probleme zu gehen.

Sicher wäre es lohnend, wenn hochschuldidaktische Forschung systematisch der Frage nachginge, wie solche Einstellungen zustande kommen und was Voraussetzungen ihrer Überwindung sind. Allerdings gibt es in solchen Fragen auch einfache Konflikte, an denen vorbei didaktische Weiterentwicklungen genau so wenig realisiert werden können, wie die prekären und auf Forschung ausgerichteten Arbeitsbedingungen ignoriert werden können.

7. Literatur

- [1] Webseite des Studienreform-Forums: <https://studienreform-forum.de/de/> (Stand 5/2025)
- [2] Studienreform-Forum (2025): Call for Papers 2024/25 <https://studienreform-forum.de/de/forum-2025/call-papers-2025/> (Stand 5/2025)
- [3] Tautz, S. (2022): Übungskonzepte der einführenden Kursvorlesung Physik – Ein Vergleich deutscher Standorte, Masterarbeit – noch nicht veröffentlicht –
- [4] Schmitt, F.-J. (2020): Education Zen, Artikel des Studienreform-Forums, <https://studienreform-forum.de/de/forum-2020/beitrage-2020/2020/02/08/essay-educationzen/> (Stand 5/2025)
- [5] Schmitt, F.-J. (2025): Das Studienreformprojekt EducationZEN, Artikel des Studienreform-Forums, <https://studienreform-forum.de/de/forum-2025/beitrage-2025/> (Stand 5/2025)
- [6] Kristkeitz, S. et al. (2025): Übungen versus Essays, Artikel des Studienreform-Forums, <https://studienreform-forum.de/de/forum-2019/beitrage-2019/2019/03/24/uebunugen-versus-essays/> (Stand 5/2025)
- [7] Hell, P. (2025): Erfahrungen an der NTNU in Trondheim, Norwegen im Zuge eines Auslandsjahres, Artikel des Studienreform-Forums, <https://studienreform-forum.de/de/forum-2025/beitrage-2025/> (Stand 5/2025)
- [8] Zusammenkunft aller Physik-Fachschaften: Sammlung aller Resolutionen und Positionspapiere, https://zapf.wiki/Sammlung_aller_Resolutionen_und_Positionspapiere (Stand 5/2025)
- [9] Pollock, S. J.; Finkelstein, N. D. (2008) : Sustaining educational reforms. In introductory physics, Phys. Rev. ST Phys. Educ. Res. **4**, 010110, <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.4.010110> (Stand 5/2025)
- [10] McDermott, L. C.; Shaffer, P. S. (2002): Tutorials in introductory physics (1. ed.). Prentice Hall series in educational innovation. Prentice Hall.
- [11] Heron, P.; Shaffer, P. S.; McDermott, L. C. (2004): Research as a Guide to Improving Student Learning: An Example from Introductory Physics. In *Invention and Impact*(2), 33–38.
- [12] Micoloi, M (2025): Flipped Classroom und Tutorials in Physics, Artikel des Studienreform-

- Forums,
<https://studienreform-forum.de/de/forum-2025/beitrage-2025/>
 (Stand 5/2025)
- [13] Moeller, J. (2025): Über den Mehrwert von Physikübungen, Artikel des Studienreform-Forums,
<https://studienreform-forum.de/de/forum-2025/beitrage-2025/>
 (Stand 5/2025)
- [14] Klesse, R. (2023): Gemeinsam ans Werk, Artikel des Studienreform-Forums,
<https://studienreform-forum.de/de/forum-2023/beitrage-2023/2023/03/04/gemeinsam-ans-werk/>
 (Stand 5/2025)
- [15] Wetzig, M. (2025): Keine Lehre auf Augenhöhe ohne Awareness, Artikel des Studienreform-Forums,
<https://studienreform-forum.de/de/forum-2025/beitrage-2025/>
 (Stand 5/2025)
- [16] Heckhausen, J.; Heckhausen, H. (2018): Hrsg., *Motivation und Handeln*. in Springer-Lehrbuch. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018.
[10.1007/978-3-662-53927-9](https://doi.org/10.1007/978-3-662-53927-9).
 (Stand 5/2025)
- [17] Odörfer, E.-M. (2025): Veränderung? Ja, bitte – nur wie?, Artikel des Studienreform-Forums,
<https://studienreform-forum.de/de/forum-2025/beitrage-2025/>
 (Stand 5/2025)
- [18] Haak, I. & Reinhold, P. (2015): Physikstudierende individuell fördern – Evaluation eines Lernzentrums. In S. Bernholt (Hrsg.), *Heterogenität und Diversität – Vielfalt der Voraussetzungen im naturwissenschaftlichen Unterricht*. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Jahrestagung in Bremen 2014 (S. 274-276). Kiel: IPN.
- [19] Meyer, L.; Seidel, T.; Prenzel, M. (2006): Wenn Lernsituationen zu Leistungssituationen werden: Untersuchung zur Fehlerkultur in einer Videostudie. In *Schweizerische Zeitschrift für Bildungswissenschaften*, 28(1), 21–41.
http://www.pedocs.de/volltexte/2011/4137/pdf/SZBW_2006_H1_S21_Meyer_D_A.pdf
 (Stand 5/2025)
- [20] Weinert, F. (1999): Die fünf Irrtümer der Schulreformer. In: *Psychologie heute*, 26, Heft 7 (1999).
- [21] Hake R. (1998): Interactive-engagement versus traditional methods: A six-thousand-student survey of mechanics test data for introductory physics courses. In: *American Journal of Physics* 66, 64-74,
<https://doi.org/10.1119/1.18809>
- [22] Riegler, P.; Kautz, C. (2021): Physik der Hochschullehre – Die Hochschullehre ist zu einem gesellschaftlich wichtigen Forschungsgegenstand der Physik geworden. In *Physik-Journal*, 20, 43-47.
- [23] Haak, I. (2016): Was macht eine gute Übung aus? – Ein Vergleich von Vorstellungen zum physikalischen Übungsbetrieb,
https://www.uni-paderborn.de/fileadmin/bildungsinnovationen-hochschuldidaktik/05_SoTL/Paderborner_Beitraege/2016/2016_Haak_dhl.pdf
 (Stand 5/2025)
- [24] Eichler, A. et al. (2013): Design of Tutorial Activities and Homework Assignments for a Large-Enrollment Introductory Course in Control Systems, In *IFAC Proceedings Volumes, Volume 46, Issue 17, 2013*, S. 43-48,
<https://doi.org/10.3182/20130828-3-UK-2039.00011>
 (Stand 5/2025)
- [25] Wagner, W. (1977): *Uni-Angst und Uni-Bluff. Wie studieren und sich nicht verlieren*. Herausgeber: Rotbuch Verlag, ISBN: 3 88022 172 3
- [26] Die Techniker Krankenkasse, Gesundheitsreport (2023): Wie geht's Deutschlands Studierenden?,
<https://www.tk.de/resource/blob/2149886/e5bb2564c786aedb3979588fe64a8f39/2023-tk-gesundheitsreport-data.pdf>
 (Stand 5/2025)
- [27] Nicol, D., Thomson, A., & Breslin, C. (2013): Rethinking feedback practices in higher education: a peer review perspective. In *Assessment & Evaluation in Higher Education*, 39(1), 102–122.
<https://doi.org/10.1080/02602938.2013.795518>
 (Stand 5/2025)
- [28] Brackertz et al. (2021): Workshop: Hochschuldidaktische Konsequenzen aus zwei Semestern Krisenlehre In: *PhyDid B 2021, Didaktik der Physik, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*,
<https://ojs.dpg-physik.de/index.php/phydid-b/article/view/1176>
 (Stand 5/2025)
- [29] Krispenz, A. (2019): *Reduktion von Prüfungsangst durch das Hinterfragen angsterzeugender Kognitionen*. Dissertation Sozialwissenschaften Universität Mannheim (2019),
https://www.edu.unibe.ch/e66/e507302/e877348/DissertationAnnKrispenzTheWork_ger.pdf
 (Stand 5/2025)
- [30] Lahme, S.; Cirkel, J.; Hahn, L.; Klein, P. (2024): Studieren am Limit, In: *Physik Journal* 07/24;
<https://pro-physik.de/zeitschriften/physik-journal/2024-7/>
 (Stand 2025)
- [31] Schiering, D.; Sorge, S.; Tröbst, S.; Neumann, K. (2023): Course quality in higher education teacher training: What matters for pre-service

physics teachers' content knowledge development? In Studies in Educational Evaluation, <http://dx.doi.org/10.1016/j.stueduc.2023.101275>

(Stand 5/2025)

[32] Wiemann, C. (2017): Improving How Universities Teach Science. Herausgeber: Harvard University Press, ISBN 978-0-674-97892-8

[33] Obwaller et al. (2024): Workshop: Vom Sinn des Physikstudiums In: PhyDid B 2024, Didaktik der Physik, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung,

<https://ojs.dpg-physik.de/index.php/phydid-b/article/view/1465>

(Stand 5/2025)