

## Konzeption, Entwicklung und Evaluation eines Laserlabors für Schüler:innen

- Eine Projektentwicklung zur Laserphysik im Design-Based-Research Verfahren -

**Roman Kuhr (geb. Gruchow)\*, Heidi Reinholz\*, Lukas Maczewsky\***

\*Universität Rostock, Institut für Physik  
roman.gruchow@uni-rostock.de

### Kurzfassung

Es wird ein Projekttag für SchülerInnen zur Laserphysik entwickelt. Zielsetzung ist die Konzeption, Entwicklung und Evaluation dieses Projekttags. Dabei wird das Projekt im Design-Based-Research Verfahren entwickelt. Es wird erforscht, welche Inhalte sich im Rahmen des Projekttages vermitteln lassen, indem Studierende begleitet und interviewt werden. Weiterhin wird untersucht, welche Lernschwierigkeiten und Hürden bei der Vermittlung auftreten. Evaluiert wird der Projekttag durch eine Befragung der Lehrkräfte und SchülerInnen sowie mit einem Fragebogen zur intrinsischen Motivation. Die Umsetzung ist im Rahmen eines Wahlpflichtseminars angelaufen und Daten werden fortlaufend erhoben. Im Folgenden wird der aktuelle Arbeitsstand geschildert.

### 1. Motivation

An der Universität Rostock werden eine Vielzahl von Vermittlungskonzepten zwischen WissenschaftlerInnen, Studierenden und SchülerInnen erprobt. Eine bewährte Methode sind sogenannte Lehr-Lern-Labore (LLL), in denen Studierende selbstgestaltete Projekte für SchülerInnen in authentischer Lernumgebung mit intra- sowie extracurricularen Themen erstellen. Zudem wird die Vermittlungskompetenz von Studierenden gestärkt [1]. An der Universität Rostock ist das LLL PhySch<sup>1</sup> (Physik und Schule) fest etabliert und bietet eine Bandbreite von Angeboten zur Mechanik, Astronomie, Elektrizitätslehre sowie abiturrelevanten Themen Schulklassen aus dem ganzen Bundesland Mecklenburg-Vorpommern. Zur Optik gibt es einen Escape-Room für die Klassenstufe 6 bis 8. Mit dem hier vorgestellten Projekt soll ein ergänzendes Angebot für SchülerInnen der Sekundarstufe II geschaffen werden. Thematisch wird die Laserphysik im Zentrum stehen und es soll die Frage beantwortet werden: Wie funktioniert ein Laser?

Im Rahmen des selbstgestaltetes SchülerInnen-Projekt erarbeiten sich Studierende Inhalte der Laserphysik, die sie anschließend gemeinsam mit Schulklassen durchführen. Die Vorteile eines LLL liegen nahe [2]: Studierende können ihre Lehrerfahrung im sicheren Umfeld erproben sowie ihr pädagogisches Fachwissen vertiefen [3]. Zudem werden von den Studierenden ausgewählte Inhalte bearbeitet, welche später in ihrer beruflichen Zukunft im schulischen Kontext eine Wiederverwendung finden können.

Die thematische Ausrichtung zielt auf die Laserphysik, insbesondere die Grundlagen und Anwendungsgebiete von Lasern, ab. Laser sind im Rahmenplan von Mecklenburg-Vorpommern nur randständig als Empfehlung zur Vertiefung enthalten, weshalb die SchülerInnen daher kein sicheres Verständnis für komplexere Zusammenhänge über den Schulstoff hinaus aufweisen [4]. Nun sollen dementsprechend die Grundlagen in der Photonik und Laserphysik gelegt werden. Daher ist die Zielstellung des Projekttages, SchülerInnen das Besondere an Lasern, die Funktionsweise, den Aufbau und die Anwendungen näher zu bringen. Dieses Projektvorhaben wird fortan als LaserLab bezeichnet.

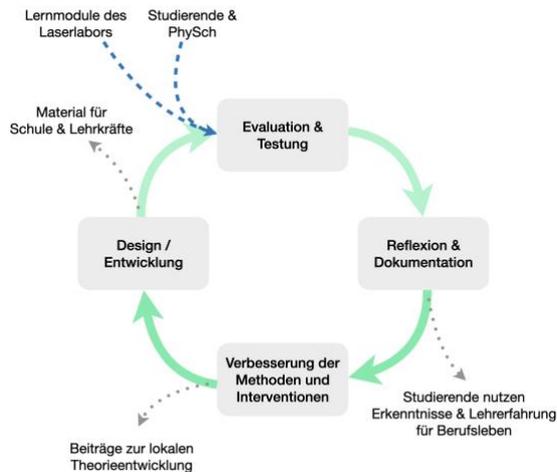
### 2. Methodik

Das Projekt wird im Design-Based-Research (DBR) Verfahren durchgeführt [5] (vgl. Abbildung 1). Das Ziel des iterativen Arbeitens im DBR-Prozess nach Anderson und Shattuck ist die Verknüpfung zwischen praktischer Entwicklung und theoriegeleiteter Forschung [6]. Im vorliegenden Fall wird eine authentische Lernumgebung an der Universität im Labor als Projekttag für SchülerInnen entwickelt und getestet. Auf Forschungsebene werden theoriegeleitet Interventionen zur Verbesserung des Lernerfolgs erprobt und somit fachdidaktische Erkenntnisse zur Vermittlung spezifischer Inhalte erworben.

In Abbildung 1 ist der DBR-Prozess für die Konzeptionierung, Entwicklung und Evaluation des LaserLabs dargestellt. Der obere Abschnitt repräsentiert die praktische Ebene, während die untere Hälfte die theoretische Ebene darstellt. Die entwickelten Lernmodule werden mit Studierenden

---

<sup>1</sup> PhySch des Instituts für Physik von der Universität Rostock: <http://web.physik.uni-rostock.de/physch/>



**Abb. 1:** Angepasster DBR-Prozess für das LaserLab

weiterentwickelt und an Schulklassen getestet. Jeder Durchführung folgen eine Dokumentation und Reflexion der Vermittlungsprozesse. Die Studierenden entwickeln dabei ihre eigenen fachdidaktischen Kenntnisse (pedagogical content knowledge, PCK) weiter und können erstellte Materialien mit in Ihr Berufsleben übernehmen [7]. Als theoretischer Schwerpunkt stehen die Interventionen im Mittelpunkt, die durchgeführt werden, um fortan den Lernerfolg zu verbessern. Dies gibt Aufschluss über themenspezifische Lernschwierigkeiten und mögliche Fehlkonzepte. Begleitet wird dieser Prozess durch schriftliche Dokumentation und einen Fragebogen. Zuletzt steht die Entwicklung bzw. das Re-Design des existierenden Projekts an, bevor der Zyklus erneut beginnt. Die Zielstellung in Bezug auf die Öffentlichkeitsarbeit ist zudem, an jeder Schnittstelle einen Mehrwert zu bieten, der über den Projekttag hinausgeht. Konkret bedeutet dies die Entwicklung von Lehrmaterial, was Lehrkräften zugänglich gemacht wird, sowie der persönliche Nutzen für Studierende und die Ableitung von Lerntheorien zu spezifischen Inhalten auf theoretischer Ebene.

Im ersten Schritt werden durch eine Inhaltsanalyse die relevanten physikalischen Konzepte zum Laser herausgestellt. Daraus werden einzelne Lernmodule abgeleitet, welche vorbereitet werden und Studierenden als Arbeitsgrundlage gegeben werden. Dies wird mit der Forschungsfrage begleitet: „Welche Inhalte über den Aufbau, die Funktionsweise und die Anwendung von Lasern können im Rahmen des Lehr-Lern-Labors vermittelt werden?“. Es wurde eine Pilotstudie in Form einer Umfrage für Physiklehrkräfte (aus Mecklenburg-

Vorpommern, N=19) durchgeführt, die die Motivation von Lehrkraft zur Teilnahme an einem außerschulischen Lernort mit ihrer Klasse erfragt. Als Grund für einen Besuch eines außerschulischen Lernorts wurde am häufigsten genannt, dass das Lernen an einem Ort außerhalb der Schule als sehr wichtig angesehen wird. Die praxisnahe Bildung und die bessere Ausstattung im Vergleich zur Schule waren die zweithäufigsten Gründe. Es werden jedoch deutlich mehr Gründe gegen die Teilnahme wie Zeitmangel, Planungsaufwand und die verbundenen Kosten genannt. Daher muss das LaserLab sowohl inhaltlich ansprechend für SchülerInnen aufbereitet sein als auch vom Angebot und der Einbeziehung in den Unterrichtskontext her für Lehrkräfte attraktiv gestaltet sein. Dem wird Rechnung getragen, indem das LaserLab inhaltlich abgeschlossen ist und thematisch äquivalente Schulstunden vollständig substituiert. In der Umfrage wurde zudem nach relevanten Inhalten aus Sicht der Lehrkräfte für die Entwicklung eines LaserLabs erfragt. Dabei war Lehrkräften besonders wichtig, den Praxis- und eigenständigen Experimentieranteil zum Aufbau, der Funktionsweise und den Anwendungen von Lasern herauszustellen.

Als Richtlinie wird der Rahmenplan des Landes Mecklenburg-Vorpommern verwendet. Es wird in der elften und zwölften Klasse vorgesehen, dass elektromagnetische Wellen, die Wechselwirkung von Licht und Materie, das Energiestufenmodell und das elektromagnetische Spektrum und Quellen unterschiedlicher Spektren behandelt werden. Zudem wird bereits zuvor in der achten, bzw. zehnten Klasse das Bohrsche Atommodell und die Erzeugung von Laserlicht qualitativ behandelt [4]. Dies sind die Anknüpfungspunkte an das Vorwissen, welche im LaserLab aufgegriffen werden und so intrinsische Motivation und einen höheren Lernerfolg gewährleisten können [8]. Um die möglichen Inhalte zu strukturieren, wurde eine Concept Map [9] erstellt und die hierarchischen Abhängigkeiten definiert. Daraus entstanden die zwei Themenbereiche der Strahlenoptik und der Atomphysik. Diese werden als zwei Lernmodule umgesetzt.

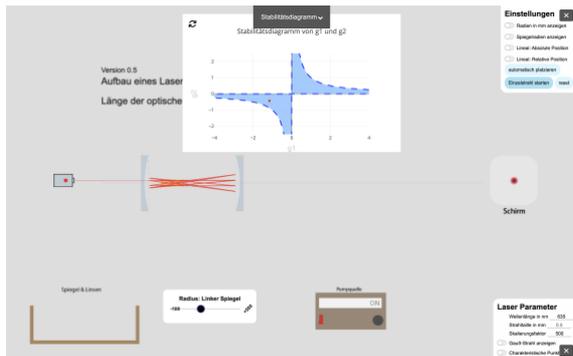
### 3. Lernmodule für Laserphysik

#### 3.1. Strahlenoptik

In dem Modul zur Optik werden optische Resonatoren betrachtet. Im Rahmen der Arbeit wurde eine eigene Simulation, auf HTML und JS basierend, entwickelt<sup>2</sup>. Dort kann die Funktionsweise von optischen Resonatoren und die Parameter, die den Aufbau beeinflussen, untersucht werden (s. Abbildung 2). Durch interaktive Elemente ist es möglich, SchülerInnen einen intuitiven Zugang zur

<sup>2</sup> Die Simulation wird in Kürze auf der Offenen Uni Rostock unter einem Ilias-Kurs in der Physikdidaktik zu finden sein <https://ilias.uni->

[rostock.de/ilias.php?cmd=frameset&cmdClass=ilrepositorygui&cmdNode=13k&baseClass=ilRepositoryGUI](https://ilias.uni-rostock.de/ilias.php?cmd=frameset&cmdClass=ilrepositorygui&cmdNode=13k&baseClass=ilRepositoryGUI)



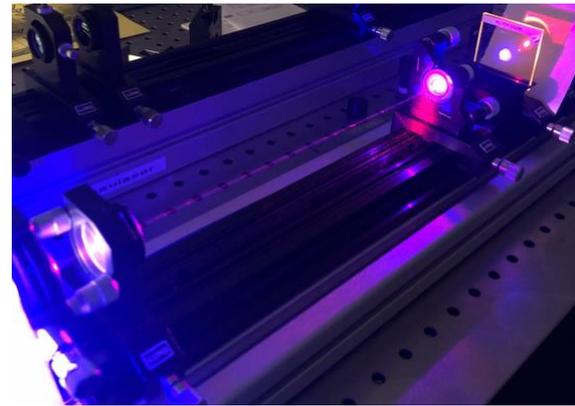
**Abb. 2:** Simulation zu Resonatoren und Lasern

Physik zu schaffen und der Kovariationsaspekt ermöglicht eine dynamische Betrachtungsweise der Parameter des optischen Resonators [10]. Durch die Programmierung einer Simulation ist es möglich, Inhalte des LaserLabs über das Projekt hinaus in Schulen zu transferieren und Lehrmaterialien für Lehrkräfte anzubieten. In Abbildung 2 ist ein Laseraufbau mit 2 Hohlspiegeln dargestellt, sowie das Stabilitätsdiagramm. In den rechten Ecken gibt es Einstellungsmöglichkeiten sowie die Darstellung physikalischer Parameter des vorliegenden Laserresonators.

LehrerInnen beziehen den meisten Mehrwert aus vorhandenen Materialien und geplanten Unterrichtskonzeptionen, welcher mittels der erstellten Materialien geschaffen werden soll [11]. In der zweiten Hälfte des Strahlenoptik-Moduls lernen SchülerInnen den konkreten Aufbau von typischen Lasern kennen, welcher an das Vorwissen aus der Schule anknüpft. Darüber hinaus wird der Aufbau eines Lasers mit der Funktionsweise des optischen Resonators verknüpft. Das Modul wird durch das Experimentieren am Helium-Neon-Laser abgeschlossen. Dabei werden auf einer optischen Bank das Lasermedium sowie die Spiegel für den Resonator platziert. Es wird untersucht, unter welchen Bedingungen das Lasen einsetzt. Zudem ist die praktische Realisierung im Experiment der zuvor erlernten, simulationsgestützten Inhalte zum Stabilitätsbereich sichtbar. Dies ermöglicht ein tieferes Verständnis für die Konzepte, da Inhalte multimodal repräsentiert werden [12].

### 3.2. Atomphysik

Im zweiten Modul wird das Laserprinzip auf atomarer Ebene erarbeitet. SchülerInnen sind bereits der Aufbau von Atomen und die Wechselwirkung zwischen Licht und Materie grundlegend bekannt [4]. An diese Inhalte wird thematisch angeknüpft und durch eine Simulation von PhET zur stimulierten Emission illustriert [13]. Nach Schulmeister tragen vor allem Simulationen im modernen naturwissenschaftlichen Unterricht eine besondere Rolle, denn sie lassen sich sowohl als Werkzeuge,



**Abb. 3:** Pr: YLF Laser, Pumpe @ 440nm, Lasen @ 630nm sowie auch als Lernprogramme einsetzen [14]. Sie eignen sich hervorragend zur Analyse von Lern- und Entdeckungsprozessen [15]. SchülerInnen diskutieren, welche Prozesse die Fluoreszenz im Lasermedium auslöst und welche Bedeutung die Besetzungsinversion darstellt. Weiterhin wird halb quantitativ erörtert, warum ein Laser mit einem zwei-Niveau System nicht funktionieren kann, also zwangsläufig mehr als 2 Energieniveaus benötigt werden. Es wird ein Ausblick auf die verschiedenen Lasermedien gegeben. Abschließend untersuchen SchülerInnen an einem Festkörperlaser den Aufbau und das Lasen in verschiedenen Wellenlängen. In Abbildung 3 ist dieser Vorgang zu erkennen: Links außerhalb des Bildes sitzt der Kristall des Festkörperlaser, welcher mit blauem Licht einer Laserdiode gepumpt wird, während das Lasen im roten Wellenlängenbereich stattfindet. Besonders die Änderung der Farbe stellt ein Erkenntnismoment dar, da eine mögliche Fehlvorstellung<sup>3</sup> sein könnte, dass der Laserbetrieb nur einfarbig und unveränderbar ist [16].

Dies beugt darüber hinaus einer weiteren Fehlvorstellung vor, nämlich dass die Farbe des Lasers erst am Ende des Laseraufbaus durch ein Farbfilter oder ähnliches entsteht. Die Untersuchung von Fehlvorstellungen wird im DBR-Prozess durch eine Befragung der Studierenden begleitet.

### 3.3. Anwendungen

Das dritte Modul schließt SchülerInnen aktiv in den Experimentierprozess ein. Es wird ein Michelson-Interferometer aufgebaut. Dieses historisch bedeutsame Experiment bietet die Möglichkeit, eine Vielzahl an physikalischen Phänomenen zu untersuchen. Gleichzeitig kann die historische und aktuelle Relevanz, exemplarisch bei der Gravitationswellenforschung, thematisiert werden. Dieses Experiment, mit Lochplatten und frei verstellbaren Komponenten, bietet zudem einen guten Einblick in die Praxis der ExperimentalphysikerInnen, die in sehr ähnlicher Art

<sup>3</sup> Nach einer Umfrage mithilfe eines selbst entwickelten Fragebogens in zu Vorstellungen zu Optik, Photonik und Laserphysik

und Weise ihre Experimente aufbauen. Beim Versuch wird die Experimentierfähigkeit und -fertigkeit der SchülerInnen geschult, da sie von Grund auf den Versuch aufbauen müssen. Die flexible Erweiterbarkeit bietet die Möglichkeit einer Binnendifferenzierung, indem optional weitere Phänomene, bspw. die Umwandlung von optischen Informationen in akustische Signale [17], zu zeigen.

Im letzten (vierten) Modul werden SchülerInnen auf eine Laborführung mit thematischem Bezug Inhalten der Arbeitsgruppen des Instituts vorbereitet. Sie erlernen zunächst, wie Laser für zeitaufgelöste Absorptionsspektroskopie oder für Materialbearbeitung genutzt werden können. Eine besondere Bedeutung kommt der Erzeugung ultrakurzer Pulse mittels modengekoppelter Laser zu. SchülerInnen erfahren zunächst, wie diese Methoden funktionieren, bevor die Laborführung anschließt. Die Vorbereitung hat das Ziel, dass die SchülerInnen ein besseres Verständnis für die Physik erlangen und die Erklärungen im Labor besser nachvollziehen können. Zudem ist der cognitive load (CL) bei einer unvorbereiteten Laborführung recht groß, da die Lernenden in eine unbekannte und möglicherweise sinnlich überfordernde Umgebung geführt werden [18]. Zusätzlich spielt die Interaktion mit der WissenschaftlerIn noch in den CL mit hinein, sodass für die Physik kaum mentale Ressourcen bleiben, um einen nachhaltigen Effekt für den Wissenserwerb zu erhalten. SchülerInnen begegnen bei der Laborführung FachwissenschaftlerInnen und erhalten einen konkreten Einblick in die Arbeit von ExperimentalphysikerInnen. Als Ziel steht hierbei nicht nur die Wissensvermittlung, sondern auch das Wecken von Interesse und Studienmotivation. Dies wird mit der Forschungsfrage untersucht: Inwiefern trägt das Laserlabor zur Verbesserung der intrinsischen Motivation im Physikunterricht und einer Änderung oder Stärkung des Studieninteresses bei? Die Untersuchung wird mithilfe der Kurzsкала zur intrinsischen Motivation nach Wilde nach Beendigung des LaserLabs mit den SchülerInnen durchgeführt [19].

#### 4. Umsetzung

Die Entwicklung des Projekts wird aktuell als Wahlpflichtmodul für Lehramtsstudierende umgesetzt. Zu Beginn des Projekts werden die Studierenden interviewt, um ihren Wissensstand zu ermitteln und mögliche Fehlvorstellungen aufzudecken. Da die Arbeitsgruppe eine heterogene Struktur (2. Semester bis 6. Semester) ausweist, ist das Vorwissen entsprechend unterschiedlich, sodass

einige Studierende nur mit Schulwissen in das Projekt starten. Der Ablauf des Seminars ist wie folgt aufgebaut: Es findet eine Einführung mit Laserschutzbelehrung statt. Weiterhin werden grundlegende didaktische Prinzipien zum Design von Lehr-Lern-Umgebungen und Unterricht dargestellt. Danach werden die erarbeiteten Freihand- und Labor-Experimente sowie Simulationen vorgestellt und von den Studierenden erkundet. Die Beobachtungs- und Selbstreflexionsaufgabe besteht darin, eigene Fragestellungen und Schlüsselerlebnisse bei der Beschäftigung mit den Experimenten zu notieren und als möglichen Einstieg für ein Modul zu implementieren. Dies schult zudem die Reflexionsfähigkeit der Studierenden. Im Anschluss erhalten die Studierenden eine Schulung<sup>4</sup> sowie selbstständige Leseaufträge, um sich mit der Laserphysik näher vertraut zu machen. Die Studierenden befassen sich zudem mit dem Rahmenplan und dem Vorwissen, was für das Projekt vorausgesetzt werden kann.

Das entwickelte LaserLab-Projekt wird von den Studierenden mit Schulklassen mehrfach durchgeführt. Bei jeder Iteration wird der oben in Abbildung 1 beschriebene Prozess durchlaufen. Es erfolgt die schriftliche Dokumentation im Entwicklungs- und Reflexionsprozess. Damit sollen sowohl Lernschwierigkeiten als auch in der Vermittlung herausfordernde Inhalte der Laserphysik ermittelt werden. Die Lehrkräfte und SchülerInnen erhalten nach der Durchführung einen Feedback-Fragebogen sowie die Kurzsкала zur intrinsischen Motivation.

#### 5. Ausblick

Aktuell läuft die Entwicklung mit den Studierenden zum LaserLab. Es zeigt sich, dass das Vorhaben aus zweierlei Gründen herausfordernd ist: Zum einen bringen die SchülerInnen wenig Vorwissen zum Projekttag mit, sodass alle Grundlagen geschaffen werden müssen, bevor mit den eigentlichen Inhalten zur Laserphysik und entsprechenden Experimenten gestartet werden kann. Außerdem ist das Vorwissen der Studierenden selbst heterogen, sodass in der Wahlpflichtveranstaltung eine umfassende inhaltliche Schulung nötig ist, mit der ein zeitlicher Engpass einhergeht. Es bleibt folglich offen, wie weit die angedachten Lernmodule und Konzepte unter den gegebenen Rahmenbedingungen umgesetzt werden können. Zudem steht die Durchführung noch aus. Dementsprechend ist die Evaluation des LaserLabs noch nicht abgeschlossen und es bleibt abzuwarten, wie sich die intrinsische Motivation und das

<sup>4</sup> Die Inhalte werden in zwei Veranstaltungen je 90 Minuten vermittelt. Folgende Aspekte werden behandelt: Geschichte des Lasers, Grundlagen der Elektrodynamik, Allgemeine Lasereigenschaften, Funktionsprinzip und Einstein-Koeffizienten, Fabry-Perot, Linienverbreiterung, Stabilität &

Resonatordesign, ABCD-Formalismus & Strahlpropagation, Gaußstrahlen, Transversale Elektromagnetische Moden (TEM), Anschwingen; Lebensdauer angeregter Zustände; Sättigung, Nicht-Lineare Optik & Frequenzverdoppelung, Lasertypen

Studieninteresse durch den Besuch verändern werden.

## 6. Literatur

- [1] RÖLLKE, KERSTIN: Was kann ein Schülerlabor leisten? Konzeptionierung des Schülerlabors teutolab-biotechnologie als Lehr-Lern-Labor mit Angeboten zur Breiten- und zur Begabtenförderung von Schülerinnen und Schülern, Universität Bielefeld (2019), S. 15570028 bytes
- [2] PRIEMER, B. ; ROTH, J. (Hrsg.): *Lehr-Lern-Labore: Konzepte und deren Wirksamkeit in der MINT-Lehrpersonenbildung*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2020 — ISBN 978-3-662-58912-0
- [3] PREDIGER, SUSANNE ; LINK, MICHAEL ; HINZ, RENATE ; HUßMANN, STEPHAN ; THIELE, JÖRG ; RALLE, BERND: Lehr-Lernprozesse initiieren und erforschen –
- [4] MINISTERIUM FÜR BILDUNG UND KINDERTAGESFÖRDERUNG: <https://www.bildung-mv.de/schueler/schule-und-unterricht/faecher-und-rahmenplaene/rahmenplaene-an-allgemeinbildenden-schulen/physik/> (Stand: 12/2023)
- [5] THE DESIGN-BASED RESEARCH COLLECTIVE: Design-Based Research: An Emerging Paradigm for Educational Inquiry. In: *Educational Researcher* Bd. 32 (2003), Nr. 1, S. 5–8
- [6] ANDERSON, TERRY ; SHATTUCK, JULIE: Design-Based Research: A Decade of Progress in Education Research? In: *Educational Researcher* Bd. 41 (2012), Nr. 1, S. 16–25
- [7] BROMME, RAINER: Was ist „pedagogical content knowledge“? Kritische Anmerkungen zu einem fruchtbaren Forschungsprogramm, Beltz : Weinheim u.a. (1995) — ISBN 9783407411341
- [8] GROß, CHRISTIAN: *Die Bedeutung von Vorwissen für den Lernerfolg*. Heppenheim : Grin, 2013 — ISBN 978-3-656-61403-6
- [9] GOWIN, D. BOB ; NOVAK, JOSEPH D.: *Learning How to Learn*. Cambridge : Cambridge University Press, 1984 — ISBN 978-0-521-31926-3
- [10] ROLFES, TOBIAS ; ROTH, JÜRGEN ; SCHNOTZ, WOLFGANG: Der Kovariationsaspekt in der Sekundarstufe I [The aspect of covariance in secondary school]. In: , 2013 — ISBN 978-3-942197-33-5, S. 834–837
- [11] BREUER, JUDITH: *Implementierung fachdidaktischer Innovationen durch das Angebot materialgestützter Unterrichtskonzeptionen. Fallanalysen zum Nutzungsverhalten von Lehrkräften am Beispiel des Münchener Lehrgangs zur Quantenmechanik*. Berlin : Logos Verlag Berlin, 2021 — ISBN 978-3-8325-5293-0
- [12] MAYER, RICHARD E.: *Multimedia Learning*. 2. Aufl. Cambridge : Cambridge University Press, 2009 — ISBN 978-0-521-73535-3
- [13] *PhET Interactive Simulations*. URL <https://phet.colorado.edu/>. - abgerufen am 2023-12-12. — PhET
- [14] SCHULMEISTER, R.: *Grundlagen hypermedialer Lernsysteme: Theorie - Didaktik - Design* : Oldenbourg, 2002 — ISBN 978-3-486-25864-6
- [15] LANGLEY, PAT ; SIMON, HERBERT A. ; BRADSHAW, GARY L. ; ZYTKOW, JAN M.: *Scientific discovery: Computational explorations of the creative processes., Scientific discovery: Computational explorations of the creative processes.* Cambridge, MA, US : The MIT Press, 1987 — ISBN 0-262-12116-6
- [16] KIRCHER, E. ; GIRWIDZ, R. ; FISCHER, H. E. (Hrsg.): *Physikdidaktik / Grundlagen*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2020 — ISBN 978-3-662-59489-6
- [17] BOHL, T. ; BÖNSCH, M. ; TRAUTMANN, M. ; WISCHER, B. (Hrsg.): *Binnendifferenzierung. Teil 1*. 1. Aufl. : Verlag Barbara Budrich, 2012 — ISBN 978-3-934575-59-2
- [18] SKULMOWSKI, ALEXANDER ; REY, GÜNTER DANIEL: Subjective cognitive load surveys lead to divergent results for interactive learning media. In: *Human Behavior and Emerging Technologies* Bd. 2, John Wiley & Sons, Ltd (2020), Nr. 2, S. 149–157
- [19] WILDE, MATTHIAS ; BÄTZ, KATRIN ; KOVALEVA, ANASTASSIYA ; URHAHNE, DETLEF: Überprüfung einer Kurzskala intrinsischer Motivation (KIM). In: *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften, Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*.

## Danksagung

Die Arbeit wird durch das TP Ö des DFG-Sonderforschungsbereichs SFB 1477: Licht-Materie-Wechselwirkung an Grenzflächen (LiMatI) am Institut für Physik der Universität Rostock gefördert.