

## Entwicklungsvalidierung von Anleitungen zum selbstständigen Arbeiten im Physikunterricht

Roland Berger\*, Maria Danzglock<sup>+</sup>, Martin Hänze<sup>+</sup>

\*Universität Osnabrück, Barbarastraße 7, 49076 Osnabrück

<sup>+</sup>Universität Kassel, Holländische Straße 36-38, 34127 Kassel  
r.berger@uos.de

### Kurzfassung

Die Entwicklung von hochwertigen schriftlichen Anleitungen zum selbstständigen Arbeiten im Physikunterricht ist herausfordernd. Denn die Anleitungen sollten so gestaltet werden, dass es zu keinem Abbruch der Lernbemühungen kommt, sondern eine fokussierte Verarbeitung der Lerninhalte unterstützt wird. In einem Forschungsprojekt zum Erlernen der Dreifingerregel explorierten Schülerinnen und Schüler der 12. Jahrgangsstufe die Bewegung von Ladungsträgern in Magnetfeldern mithilfe eines Computerspiels anhand einer schriftlichen Anleitung. Die Anleitung wurde in zwei Schritten validiert. Im ersten Schritt wurden 14 Paare von Schülerinnen und Schülern beim Explorieren teilnehmend beobachtet. Dabei wurden schwierigkeiterzeugende Merkmale der Anleitung registriert, und die Anleitung auf dieser Grundlage fortlaufend weiterentwickelt. Im Rahmen einer quantitativen Studie ( $N = 75$ ) wurde in einem zweiten Schritt gezeigt, dass die finale Form der Anleitung zum erfolgreichen Entdecken der Dreifingerregel geeignet ist. Dieser Ansatz zur Validierung von Anleitungen könnte auch in anderen Lernumgebungen hilfreich sein, die auf selbstständiger Arbeit der Lernenden basieren, zum Beispiel bei der Entwicklung von Anleitungen für Schülerversuche.

### 1. Hintergrund

Schriftliche Anleitungen haben große Bedeutung für das Lernen im naturwissenschaftlichen Unterricht. Hierzu gehören zum Beispiel das angeleitete Experimentieren oder das Lernen mit Computerspielen. Entscheidend für den Lernerfolg ist dabei die Qualität der schriftlichen Anleitungen. Durch sie sollte die Aufmerksamkeit der Lernenden auf die zentralen Konzepte und Prinzipien gelenkt, und so deren fokussierte Verarbeitung unterstützt werden (Renkl, 2015).

Um die Qualität von schriftlichen Anleitungen sicherzustellen, ist deren Evaluation wichtig. Der Begriff der „Entwicklungsvalidierung“ („developmental validity“) erscheint in diesem Zusammenhang hilfreich. Er ist in der Lehr-Lern-Forschung allerdings kaum gebräuchlich, wird aber in der professionellen Fortbildung und der Produktentwicklung intensiv genutzt. Dort findet man folgende Definition: „Die Entwicklungsvalidierung dient der Feststellung, ob das resultierende Produkt in der Lage ist, die Anforderungen für den festgelegten oder beabsichtigten Gebrauch zu erfüllen“ (Falk, 2017).. Der im Bereich der Sozialarbeit forschende Edwin J. Thomas erläutert den Begriff der Entwicklungsvalidierung folgendermaßen: „Interventions that have developmental validity have been evolved

by means of developmental processes that increase the likelihood that the innovations will be reliable and will not have to be redesigned to achieve the objectives of the intervention.“

Eine unterrichtsnahe Konzipierung des Begriffs der Validität im Hinblick auf Testinstrumente wird von Pellegrino, DiBello und Goldman (2016) vorgeschlagen. Das Konzept basiert auf den Arbeiten von Messick (1995) sowie Kane (1992, 2013), betont aber stärker die Wechselwirkung von Testinstrumenten mit dem Lehren und Lernen im Unterricht. Das Ausmaß an Überschneidung von unterrichtlichem Inhalt und Testinhalt ist durch das Ausmaß an Nutzung passender Lerngelegenheiten gegeben. Diese Überlegungen machen deutlich, dass Validität nicht als Eigenschaft eines Testinstruments aufgefasst werden sollte, sondern durch eine Wechselwirkung mit dem Unterricht zu beschreiben ist, in dem die entsprechenden Kompetenzen vermittelt werden sollen. In diese moderne Interpretation des Begriffs Validität kann die fachdidaktische Auffassung von „Entwicklungsvalidität“ von Unterrichtsmaterialien sinnvoll eingeordnet werden.

Pellegrino et al. fokussieren zwar auf die Validierung von Tests („assessment“). Im Sinne von „Entwicklungsvalidierung“ nutzen wir sinnvollerweise deren Begrifflichkeit aber auch für die Validierung

von Unterrichtsmaterialien wie z. B. schriftliche Anleitungen für das selbstständige Lernen. Zentrale Elemente von Validität sind nach Pellegrino et al. die kognitive Validität sowie die instruktionale Validität. Kognitive Validität meint zunächst die Übereinstimmung von im Unterricht intendierten kognitiven Prozessen mit denjenigen beim Bearbeiten von zugehörigen Testaufgaben. In Bezug auf das Lernen basierend auf schriftlichen Anleitungen erscheint es daher wichtig zu zeigen, dass die intendierten kognitiven Prozesse tatsächlich durch die Lernumgebung – z.B. einem Computerspiel mit der zugehörigen schriftlichen Anleitung – angeregt werden. Instruktionale Validität ist ein Maß dafür, inwieweit ein Testinstrument sensitiv für die unterrichtlichen Lernziele ist (Yoon & Resnick, 1998). Dem entsprechend wird dieser Aspekt von Validität oft auch als Instruktionssensitivität bezeichnet (Polikoff, 2010). Nach Polikoff basiert ein Argument für Instruktionssensitivität auf dem Befund, dass sich das Lernen mit schriftlichen Anleitungen in einer höheren Testleistung im Vergleich zu einem Vortest widerspiegelt.

Im Folgenden werden zwei Studien vorgestellt, die im Rahmen der Entwicklungsvalidierung einer schriftlichen Anleitung zum geleiteten Entdecken (guided discovery; Lavine, 2012) der Dreifingerregel mithilfe eines computerbasierten Lernspiels durchgeführt wurden. Daher soll das Computerspiel mithilfe von Abbildung 1 zunächst kurz beschrieben werden. Beim Computerspiel „E-Raser“ geht es darum, in einem Magnetfeld von einem Raumschiff aus mithilfe geladener Geschosse Meteoriten abzuschießen, welche die Erde bedrohen. Diese Spielidee soll ein qualitatives Verständnis der Lorentzkraft mithilfe der Dreifingerregel fördern.

## 2. Studie 1: Kognitive Validierung

Im Rahmen einer teilnehmenden Beobachtung (Schönhagen, 2021) hat der Erstautor 14 Schülerpaare beim Arbeiten mit einer Anleitung zur Entdeckung der Dreifingerregel mit dem Computerspiel beobachtet. Immer dann, wenn Schülerinnen oder Schüler beim Spielen in eine „Sackgasse“ gerieten, wurden Feldnotizen angefertigt, um die Schwierigkeit möglichst genau beschreiben zu können. Als Indikatoren für das Erreichen einer Sackgasse wurde der Abbruch der Lernbemühungen, eine entsprechende Äußerung wie „Wir wissen nicht weiter!“ oder das Beschreiten von Abwegen (z.B. die sinnlose Anwendung der Dreifingerregel auf die Bewegung parallel zum Magnetfeld) gewertet. Auf dieser Basis entstand eine tabellarische Übersicht, welche die



**Abb. 1:** Computerbasiertes Lernspiel „E-Raser“. Ziel des Spieles ist, von einem Raumschiff aus mit elektrisch geladenen Geschossen Meteoriten abzuschießen, die sich in einem Magnetfeld befinden. In der durch einen orangenen Rahmen hervorgehobenen aktiven Spielsituation links ist die Bahn des negativ geladenen Geschosses gelb dargestellt. Die Ablenkung erfolgt durch die Lorentzkraft im Magnetfeld. Das Vorzeichen der Ladung der Geschosse kann mit dem gelben Button geändert werden. Außerdem kann die Richtung des Magnetfelds rechts unten ausgewählt werden. Dies ermöglicht den Vergleich der Wirkung zweier unterschiedlich gerichteter Magnetfelder auf die Bewegung geladener Geschosse in den Spielsituationen links bzw. rechts.

Art der „Sackgasse“ und die getroffenen Schlussfolgerungen für die Überarbeitungen der Anleitung enthält (Abbildung 2).

In der linken Spalte 1 steht die Nummer des jeweils beobachteten Schülerpaares sowie das Datum der Beobachtung. In Spalte 2 ist die Version der verwendeten Anleitung zu sehen. In den Spalten 3 und 4 sind die Beschreibungen der Sackgassen sowie die Schlussfolgerungen für die Überarbeitungen der Anleitungen knapp zusammengefasst.

Zunächst war geplant, die Anleitung mit der Hälfte der Schülerpaare unverändert zu testen, und mit der zweiten Hälfte eine Revision der Anleitung. Die Art der auftretenden Schwierigkeiten hat es aber in der Regel als sinnvoll erscheinen lassen, die entsprechende Überarbeitung unverzüglich vorzunehmen, und mit dem nächsten Schülerpaar zu erproben. Insgesamt wurden somit neun verschiedene Fassungen der schriftlichen Anleitung eingesetzt, bevor die finale Version formuliert wurde. Zur Illustration werden im Folgenden einige zentrale Änderungen an der schriftlichen Anleitung beschrieben.

Bereits in der Version 2 wurde die Anleitung in zwei Teile aufgeteilt, und zeitversetzt administriert. Im ersten Schritt (Phase der Exploration) wurde die Erkundung der Bewegung von Ladungsträgern in Magnetfeldern angeregt (Abbildung 3). Die finale Form der Anleitung für den zweiten Schritt (Phase der Explanation) ist in Abbildung 4 zu sehen.

Paar (Datum)	Version Anleitung	Beschreibung der "Sackgasse"	Schlussfolgerungen für die Überarbeitung
1 (5.6.23)	V1	Funktion 3. Finger? – Hinweis auf Zuordnung der Finger	<ul style="list-style-type: none"> <li>Am Anfang Info über Finger (welche; senkrecht)?</li> <li>Begriffe DFR/LK am Anfang noch nicht nennen?</li> </ul>
2 (5.6.23)	V1	<ul style="list-style-type: none"> <li>Völlig falscher Ansatz mit den Fingern</li> <li>Mit paralleler Bewegung ins Abseits</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nennung DFR nicht am Anfang</li> <li>Anleitung in 2 Phasen aufgeteilt</li> </ul>
3 (6.6.23)	V2	keine (da schnell richtige Finger verwendet)	
4 (6.6.23)	V2	keine	
5 (7.6.23)	V2	keine	Sollte "Senkrechtstehen" mitgeteilt werden?
6 (9.6.23)	V3	Fehlvorstellung bis zum Schluss: "je nach Richtung (wie im elektrischen Feld) mit positiven bzw. negativen Ladungen schießen"	Zuordnung der Finger unklar
7 (12.6.23)	V4	Schüler arbeiten sich an paralleler Richtung ab; mit Hilfen aus Sackgasse heraus	<ul style="list-style-type: none"> <li>Parallele Bewegung schwierig</li> <li>Begriff "Richtung der Bewegung"</li> </ul>
8 (15.6.23)	V5	keine	Nennung der drei Finger (Daumen etc.) nicht notwendig (Diskussion)
9 (18.6.23)	V6	Parallele Bewegung – kommen selbst aus Sackgasse: Regel "außer Kraft gesetzt"	
10 (16.6.23)	V 6	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nutzen nicht die eigenen Finger ("Hat DFR mit Fingern zu tun?); nach Hinweis spontan richtige Finger</li> <li>Sackgasse "Parallele Bewegung"; meine Hilfe, dass DFR dafür nicht nötig</li> </ul>	Parallele Bewegung war oft schwierig, daher in Anleitung V7 explizit hervorgehoben. V7 wurde nochmal wesentlich verändert und als V8 dann bei Dyade 11 eingesetzt. Hinweis auf "eigene Finger" in V10
11 (26.6.23)	V8	Lernschwierigkeiten u.a.: "Richtung der Kraft: Magnetfeld oder Bewegungsrichtung?" führt in Sackgasse –Hilfe: ich zeige Fingerhaltung	Richtung der Geschwindigkeit muss explizit und zusammenhängend geschrieben werden (in V9 umgesetzt)
12 (26.6.23)	V8	Sackgasse: „Was heißt: „stehen paarweise senkrecht aufeinander?“ –kommen nicht heraus	"senkrecht" in V10 durch "Winkel von 90 Grad" ersetzt
13 (27.6.23)	V9	Schulervorstellung: Beeinflussung des Meteoriden durch Magnetfeld (wird aber selbstständig verworfen)	keine wesentlichen Schwierigkeiten
14 (27.6.23)	V9	Begriff "senkrecht" schwierig ("Gegenteil von Waagrecht")	

**Abb. 2:** Überblick über die Ergebnisse der kognitiven Validierung. Insgesamt wurden 14 Paare beobachtet (Spalte 1). Die Beschreibung der „Sackgasse“ (Spalte 3), und die daraus gezogenen Schlussfolgerungen für die Überarbeitungen der schriftlichen Anleitungen (Spalte 4) führten zu einer fortlaufenden Überarbeitung und Anleitungen mit zunehmender Versionsnummer (Spalte 2). Zur Farbmarkierung: Die Dreifingerregel wurde entdeckt (grün), teilweise entdeckt (gelb) bzw. nicht entdeckt (rot).

### Wie bewegt sich ein Ladungsträger im Magnetfeld?

Erkunden Sie mithilfe des Lernprogramms die Bewegung von Ladungsträgern im Magnetfeld. Verändern Sie dazu systematisch die Richtung des Magnetfelds und beobachten sie jeweils den Einfluss auf die Bahn des Ladungsträgers. Notieren Sie für alle Richtungen des Magnetfelds Ihre Ergebnisse zum Beispiel in Form von „Wenn – Dann“ – Regeln oder skizzieren Sie die Feldlinien und Bahnen. Diese Aufzeichnungen können Sie später noch gebrauchen.

Sie sind fertig, wenn Sie für jede Richtung des Magnetfelds vorhersagen können, wie sich ein Ladungsträger bewegen wird. Prüfen Sie dies an einigen Beispielen.

*Melden Sie sich anschließend, um weitere Informationen zu erhalten.*

**Abb. 3:** Finale Form der Anleitung für die erste Phase (Exploration)

### Wie kann man die Richtung der Kraft im Magnetfeld vorhersagen?

Wie Sie bereits wissen, wird eine Ablenkung eines Objekts von einer geraden Bahn immer durch eine Kraft verursacht. Wenn ein bewegter Ladungsträger im Magnetfeld abgelenkt wird, dann wird dies durch die so genannte „Lorentz-Kraft“ verursacht. Um die Richtung der Lorentz-Kraft vorhersagen zu können ist es nützlich, mehrere Möglichkeiten in einer gemeinsamen Regel zusammenzufassen. Diese Regel wird als „Drei-Finger-Regel“ bezeichnet.

#### Wir unterscheiden zwei Fälle:

##### 1) Bewegung parallel zum Magnetfeld.

Wie Sie in Ihren Erkundungen wahrscheinlich festgestellt haben, werden Ladungsträger bei der Bewegung parallel zu den Magnetfeldlinien nicht abgelenkt. Auf diese Ladungsträger wird keine Lorentz-Kraft ausgeübt. Für die Bewegung parallel zum Magnetfeld brauchen wir also keine Regel.

##### 2) Bewegung senkrecht zum Magnetfeld.

Finden Sie die Drei-Finger-Regel auf der Grundlage Ihrer bisherigen Erkundungen heraus. Dazu ordnen Sie drei Ihrer Finger jeweils eine der folgenden physikalischen Größen zu:

- die Richtung der momentanen Geschwindigkeit eines Ladungsträgers.
- die Richtung des Magnetfelds und
- Die Richtung der Lorentz-Kraft,

**Hinweis:** Diese drei Richtungen schließen paarweise einen Winkel von 90 Grad ein.

#### Erarbeiten Sie die „Drei-Finger-Regel“ mithilfe des Lernspiels.

**Abb. 4:** Finale Form der Anleitung für die zweite Phase (Explanation). Farblich markiert sind Änderungen gegenüber früheren Versionen der Anleitung. Diese sind im Text erläutert.

Um die Entwicklung der schriftlichen Anleitungen zu illustrieren, gehen wir exemplarisch auf drei ausgewählte Änderungen gegenüber Vorgängerversionen ein. Diese sind in Abbildung 4 farblich hervorgehoben.

- 1) Gelb markiert ist die explizite Trennung der Bewegungen parallel (1) bzw. senkrecht (2) zum Magnetfeld ab der Anleitungsversion V7 (vgl. Abbildung 2, Spalte 2). Hintergrund ist die Beobachtung, dass Schülerpaare intensiv versuchten, auch die Bewegung parallel zu den Magnetfeldlinien in die Regel für die ablenkende Lorentzkraft zu integrieren. Dies ist jedoch nicht sinnvoll, da bei der Bewegung parallel zum Magnetfeld keine Kraft auf Ladungsträger ausgeübt wird. Dieser Abweg führte teilweise dazu, dass das eigentliche Ziel, die Dreifingerregel für die Richtung der Kraft auf Ladungsträger bei der Bewegung senkrecht zu den Magnetfeldlinien zu finden, völlig aus dem Blick geriet.
- 2) In den ersten Anleitungsversionen wurde der Begriff der „Bewegungsrichtung“ verwendet. Dieser Begriff wurde von Schülerinnen und Schülern teilweise als „Abschussrichtung“ in-

terpretiert. Um dem zu begegnen, wurde ab Anleitungsversion V9 der etwas sperrige Begriff der „Richtung der momentanen Geschwindigkeit“ verwendet (in Abbildung 4 grün hervorgehoben). Die abschließende Diskussion mit zwei Schülerpaaren legt nahe, dass dieser Begriff wie intendiert so verstanden wird, dass sich die Richtung der Geschwindigkeit auf der Bahn fortlaufend ändert.

- 3) Als sich in Diskussionen mit Schülerpaaren herausstellte, dass der Begriff „senkrecht“ teilweise als das „Gegenteil von waagrecht“ interpretiert wird, wurde in der Anleitungsversion V9 nicht mehr die Formulierung „stehen senkrecht aufeinander“ sondern „schließen einen Winkel von 90 Grad ein“ verwendet (blau markiert in Abb. 4).

Diese drei Beispiele sollen die wichtige Funktion der kognitiven Entwicklungsvalidierung demonstrieren. In den drei Fällen gerieten zentrale Lernziele aus dem Blick, die Lernbemühungen verliefen daher auf Abwegen oder wurden sogar ganz eingestellt. Die entsprechenden Überarbeitungen führten zu einer finalen Fassung der schriftlichen Anleitung, die eine fokussierte Verarbeitung im Hinblick auf das zentra-

le Lernziel des Entdeckens der Dreifingerregel besser unterstützt (Renkl, 2015).

### 3. Studie 2: Instruktionale Validierung

Die auf der Basis von Studie 1 entwickelte finale Form der in zwei Schritten administrierten schriftlichen Anleitung wurde in Studie 2 zur instruktionalen Entwicklungsvalidität genutzt um zu prüfen, ob die Instruktion mithilfe des Computerspiels geeignet ist, einschlägige Testaufgaben zur Bewegung von Ladungsträgern in Magnetfeldern zu lösen – mit anderen Worten wurde die Instruktionssensitivität getestet.

75 Schülerinnen und Schüler aus vier Physik-Kursen der 12. Jahrgangsstufe bearbeiteten dazu vier Transfer-Aufgaben zur Bewegung von Ladungsträgern in Magnetfeldern aus einem Standardtest (Berger, Kulgemeyer & Lensing, 2019; Aufgaben 3c, 4b und 5a sowie einer weiteren Aufgabe zur Bewegung parallel zu einem magnetischen Feld). Diese Aufgaben dienten als Vor- und Nachtest für die Instruktion mithilfe des Computerspiels basierend auf der finalen Form der zweiphasigen schriftlichen Anleitung (vgl. Abbildungen 3 und 4). Die Instruktionssensitivität wird häufig mittels des Pretest-Posttest-Difference Index (PPDI; Polikoff, 2010) erfasst. Im Durchschnitt wurden im Vortest 6% der Aufgaben richtig gelöst und im Nachtest 36%. Der Zuwachs ist statistisch signifikant ( $F(1, 73) = 62, p < .001$ ) bei großer Effektstärke (Cohen's  $d = 1.2$ ). Darüber hinaus konnte etwa die Hälfte der Schülerinnen und Schüler in einer Reproduktionsaufgabe zur Dreifingerregel einem Foto der linken Hand Daumen, Zeigefinger und Mittelfinger den entsprechenden physikalischen Größen korrekt zuordnen. Diese Ergebnisse zeigen, dass die schriftliche Anleitung grundsätzlich geeignet ist, das zentrale Lernziel der Instruktion zu erreichen.

### 4. Diskussion

Im Beitrag wurde exemplarisch gezeigt, wie auf der Basis einer schriftlichen Anleitung zum Lernen der Dreifingerregel mithilfe eines computerbasierten Lernspiels die Entwicklung der zugehörigen schriftlichen Anleitung validiert werden kann. Dazu wurde das Konzept der „Entwicklungsvalidierung“ von Unterrichtsmaterialien zugrunde gelegt. Entsprechend des Validitätskonzepts von Messick und Kane geht es bei der Entwicklungsvalidierung grundsätzlich darum, empirische Argumente dafür zu finden, dass Unterrichtsmaterialien die intendierten Zwecke erfüllen.

In einem ersten Schritt wurde dazu die kognitive Validität der schriftlichen Anleitung im Rahmen einer qualitativen Studie mit dem Ziel geprüft, sicherzustellen, dass die intendierten kognitiven Prozesse tatsächlich stattfinden, und insbesondere Lernbemühungen durch das Erreichen von „Sackgassen“ nicht abgebrochen werden. In einer quantitativen Studie auf der Basis der finalen Form der schriftlichen Anleitung wurde in einem zweiten Schritt die Lernwirksamkeit der computerbasierten Lernumgebung nachgewiesen, und so ein Argument für die instruktionale Validität der schriftlichen Anleitung gefunden. So hat die erreichte Testleistung durch Nutzung der finalen schriftlichen Anleitung vom Vortest mit durchschnittlich 6% zum Nachtest mit durchschnittlich 36% der maximal erreichbaren Punktzahl signifikant zugenommen.

Die Frage ist allerdings, wie dieses Ergebnis zur instruktionalen Validität einzuordnen ist. Dies hängt davon ab, wie das Lernen mit dem Lernspiel in den Unterricht eingebettet werden soll. Ist es Ziel des Unterrichts, unmittelbar auf ein profundes Wissen zur Dreifingerregel im weiteren Unterricht aufzubauen, so erscheint der Lernzuwachs möglicherweise zu gering. In diesem Fall könnte die Lernumgebung um geeignete Hilfestellungen erweitert werden, zum Beispiel um gestufte Lernhilfen (Schmidt-Weigand, Franke-Braun & Hänze, 2008). Auch diese erweiterte Lernumgebung wäre einer Entwicklungsvalidierung zugänglich.

Die beiden beschriebenen Validierungsstudien dienen in einem Forschungsprojekt der DFG-Forschungsgruppe „Nachhaltiges Lernen: Kognitive Mechanismen und effektive Umsetzung im Unterricht“ zur Pilotierung der schriftlichen Anleitung für das Computerspiel. Im Hinblick auf die anstehende Hauptstudie ziehen wir den so genannten „productive failure“-Ansatz von Kapur (2012) in Betracht. Basierend auf dieser Idee geht es nicht primär darum, ein Lernziel eigenständig zu erreichen. Vielmehr dient eine initiale selbstständige Arbeitsphase vor allem dazu, a) das Vorwissen zu aktivieren, b) die Aufmerksamkeit auf kritische konzeptuelle Merkmale des Konzepts zu lenken, und c) Erklärungen und Elaborationen zu diesen Merkmalen anzuregen. In einer zweiten Phase erfolgt anschließend eine direkte Instruktion zur Dreifingerregel durch die Lehrkraft.

Da beim „productive failure“-Ansatz ein erfolgreiches Finden der Dreifingerregel nicht im Vordergrund steht, ist zu erwägen, lediglich die explorative Phase entsprechend der Anleitung in Abb. 2 einer

direkten Instruktion vorzuschalten. Im Hinblick auf zukünftige Forschung bietet es sich dazu an, die Wirkungen der beiden Teilanleitungen in den Abbildungen 2 bzw. 3 zu vergleichen. Entsprechend der Unterscheidung von Vorholzer und von Aufschnaiter (2019) bietet die Anleitung zur Exploration in Abbildung 2 eine „minimale Anleitung“, und die Anleitung zur Explanatation in Abbildung 3 eine „implizite Anleitung“. Auch könnten weitere Alternativen zum „productive failure“-Ansatz genutzt werden, um die jeweils relevanten kognitiven Mechanismen besser zu identifizieren (Trninic, Sinha & Kapur, 2022).

## 5. Literatur

- Berger, R., Kulgemeyer, C. & Lensing, P. (2019). Ein Multiple-Choice-Test zum konzeptuellen Verständnis der Kraftwirkung auf Ladungsträger in statischen elektrischen und magnetischen Feldern. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 25(1), 197-210.
- Falk, H. (2017). Qualität und Norm. Online: [iso9001.qmb.info](https://iso9001.qmb.info) [20.08.2024]
- Kapur, M. (2012). Productive failure in learning the concept of variance. *Instructional Science* (40), 651-672.
- Lavine, R.A. (2012). Guided discovery learning. In N.M. Seel, (ed.), *Encyclopedia of the Sciences of Learning* (p. 1402-1403). Boston, MA: Springer.
- Pellegrino, J. W., DiBello, L. V., & Goldman, S. R. (2016). A framework for conceptualizing and evaluating the validity of instructionally relevant assessments. *Educational Psychologist*, 51, 59-
- Polikoff, M. S. (2010). Instructional sensitivity as a psychometric property of assessments. *Educational Measurement: Issues and Practice*, 29, 3-14.
- Renkl, A. (2015). Different roads lead to Rome: the case of principle-based cognitive skills. *Learning: Research and Practice* (1), 79-90.
- Schmidt-Weigand, F., Franke-Braun, G., & Hänze, M. (2008): Erhöhen gestufte Lernhilfen die Effektivität von Lösungsbeispielen? Eine Studie zur kooperativen Bearbeitung von Aufgaben in den Naturwissenschaften. *Unterrichtswissenschaft*, 36(4), 365-384.
- Schönhagen, P. (2021): Teilnehmende Beobachtung: Datenerhebung ‘haut-nah’ am Geschehen. In H. Wagner & P. Schönhagen (Hrsg.), *Qualitative Methoden der Kommunikationswissenschaft* (S. 286-298). Baden-Baden: Nomos. <https://folia.unifr.ch/unifr/documents/303824>
- Thomas, E. J. (1985). The validity of design and development and related concepts in developmental research. *Social Work Research and Abstracts*, 21(2), 50-55.
- Trninic, D., Sinha, T., & Kapur, M. (2022). Comparing the effectiveness of preparatory activities that help undergraduate students learn from instruction. *Learning and Instruction*, 82, 101688.
- Vorholzer, A. & von Aufschnaiter, C. (2019). Guidance in inquiry-based instruction – an attempt to disentangle a manifold construct. *International Journal of Science Education*, 41 (11), 1562-1577.
- Yoon, B. & Resnick, L. B. (1998). *Instructional validity, opportunity to learn and equity: New standards examinations for the California mathematics renaissance*. Los Angeles, CA: Center for the Study of Evaluation. Online: <https://cresst.org/wp-content/uploads/TECH484.pdf> [09.02.2024]

## Anhang

Wir danken den an den Studien beteiligten Schülerinnen und Schülern, deren Lehrkräften sowie der Deutschen Forschungsgemeinschaft für ihre Unterstützung.