

Studien zum Physik- und Chemielernen

M. Hopf und M. Ropohl [Hrsg.]

364

Albert Teichrew

Physikalische Modellbildung mit dynamischen Modellen

λογος

Studien zum Physik- und Chemielernen

Herausgegeben von Martin Hopf und Mathias Ropohl

Diese Reihe im Logos Verlag Berlin lädt Forscherinnen und Forscher ein, ihre neuen wissenschaftlichen Studien zum Physik- und Chemielernen im Kontext einer Vielzahl von bereits erschienenen Arbeiten zu quantitativen und qualitativen empirischen Untersuchungen sowie evaluativ begleiteten Konzeptionsentwicklungen zu veröffentlichen. Die in den bisherigen Studien erfassten Themen und Inhalte spiegeln das breite Spektrum der Einflussfaktoren wider, die in den Lehr- und Lernprozessen in Schule und Hochschule wirksam sind.

Die Herausgeber hoffen, mit der Förderung von Publikationen, die sich mit dem Physik- und Chemielernen befassen, einen Beitrag zur weiteren Stabilisierung der physik- und chemiedidaktischen Forschung und zur Verbesserung eines an den Ergebnissen fachdidaktischer Forschung orientierten Unterrichts in den beiden Fächern zu leisten.

Martin Hopf und Mathias Ropohl

Studien zum Physik- und Chemielernen

Band 364

Albert Teichrew

Physikalische Modellbildung mit dynamischen Modellen

Logos Verlag Berlin



Studien zum Physik- und Chemielernen

Martin Hopf und Mathias Ropohl [Hrsg.]

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.



Dieses Werk ist lizenziert unter einer CC BY-NC-ND Lizenz (Creative Commons Namensnennung – nicht kommerziell – keine Bearbeitung 3.0 Deutschland).

© Copyright Logos Verlag Berlin GmbH 2023

Alle Rechte vorbehalten.

ISBN 978-3-8325-5710-2

ISSN 1614-8967

DOI 10.30819/5710

Logos Verlag Berlin GmbH
Georg-Knorr-Str. 4, Geb. 10
D-12681 Berlin

Tel.: +49 (0)30 / 42 85 10 90

Fax: +49 (0)30 / 42 85 10 92

<https://www.logos-verlag.de>

Physikalische Modellbildung mit dynamischen Modellen

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Naturwissenschaften

vorgelegt beim Fachbereich Physik
der Johann Wolfgang Goethe-Universität
in Frankfurt am Main

von
Albert Teichrew
aus Makeewka (Ukraine)

Frankfurt 2022
(D 30)

Vom Fachbereich Physik
der Johann Wolfgang Goethe-Universität
als Dissertation angenommen.

Dekan: Prof. Dr. Roger Erb

Gutachter: Prof. Dr. Roger Erb
Prof. Dr. Heiko Krabbe
Prof. Dr. André Bresges

Datum der Disputation: 11.07.2023

Kurzfassung

Im naturwissenschaftlichen Unterricht setzt hypothesengeleitetes Experimentieren bei den Lernenden eine Grundvorstellung über die untersuchten Zusammenhänge voraus. Die Arbeit mit einem dynamischen Modell soll im didaktischen Konzept der physikalischen Modellbildung die Lücke zwischen einer naturwissenschaftlichen Fragestellung und einer im Experiment überprüfaren Hypothese schließen.

Die Anwendung des aus erkenntnistheoretischen Überlegungen abgeleiteten Konzepts wird in einer explorativen Studie im Mixed-Methods-Design analysiert, in der sich $N = 41$ Lehramtsstudierende mit GeoGebra-Modellen auf ein Experiment im Praktikum der Optik vorbereiten. Anhand von Videoaufnahmen werden Faktoren und Verhaltensmuster der Arbeit mit einem dynamischen Modell identifiziert. Diese Merkmale werden in Abhängigkeit individueller Lernvoraussetzungen auf Zusammenhänge mit der Qualität und Quantität der formulierten Hypothesen sowie den Handlungen im Experiment untersucht.

Aus den Daten wird ersichtlich, dass die Formulierung komplexer Hypothesen und ihre Überprüfung in einem Experiment erst bei gründlicher Arbeit mit dem dynamischen Modell erfolgt. Als Ergebnis werden Gestaltungsempfehlungen für dynamische Modelle abgeleitet, die eine zielgerichtete Untersuchung des modellierten Systems ermöglichen. Sie werden in einem Unterrichtskonzept für die Optik umgesetzt, das sich durch die Modellierung optischer Phänomene und die Überprüfung der Modellaussagen in Experimenten auszeichnet.

Schlagwörter

- Naturwissenschaftliche Erkenntnisgewinnung
- Modellbildung
- Experimentieren
- Augmented Reality

Abstract

In science teaching, hypothesis-based experimentation requires that learners have a basic idea of the relationships they are investigating. In the teaching structure called physical modelling, working with a dynamic model is intended to close the gap between a scientific question and a hypothesis that can be tested in an experiment.

The implementation of the concept derived from epistemological considerations is analysed in an exploratory study in a mixed methods design in which $N = 41$ student teachers use GeoGebra models to prepare for an experiment in an undergraduate optics laboratory course. Video recordings are used to identify factors and behavioural patterns of working with a dynamic model. These characteristics are examined for connections with the quality and quantity of the formulated hypotheses as well as the actions in the experiment depending on individual learning preconditions.

The data shows that the formulation of complex hypotheses and their testing in an experiment occur after thorough work with the dynamic model. As a result, design recommendations for dynamic models are derived, which are supposed to enable a targeted investigation of the modelled system. These recommendations are implemented in a teaching concept for optics, which includes the modelling of optical phenomena and the verification of model statements through experiments.

Keywords

- Scientific inquiry
- Modelling
- Experimenting
- Augmented Reality

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen beteiligten Personen danken, die mich in den verschiedenen Phasen meiner Arbeit an dieser Dissertation unterstützt haben.

Besonders danken möchte ich Roger Erb und Thomas Wilhelm für die hervorragende Betreuung und Einbeziehung in Projekte und Publikationen.

Außerdem möchte ich mich bei meinen Kolleginnen und Kollegen Laura Muth, Jeremias Weber, Jan Winkelmann, Lion Glatz, Laura Sührig und Mareike Freese bedanken, die mich auf meinem Weg mit produktiven Gesprächen in der Arbeitsgruppe begleitet haben.

Nicht zuletzt muss ich Julian Weide und Jelka Weber, die meine Projekte durch ihre Unterstützung als studentische Hilfskräfte erleichtert haben, und allen Studierenden, Lehrkräften sowie Lernenden, die an Lehrvorhaben und Erhebungen teilgenommen haben, meinen Dank äußern.

Für die finanzielle Unterstützung bei der Umsetzung meiner Untersuchungen danke ich der *Joachim Herz Stiftung* und der *Stiftung Polytechnische Gesellschaft*.

Meinen Eltern und meiner langjährigen Partnerin danke ich für ihre Ermutigungen während des Studiums und der darauffolgenden wissenschaftlichen Tätigkeit.

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|-------|---|
| 3D | dreidimensional, drei Dimensionen |
| AR | Augmented Reality |
| BYOD | Bring Your Own Device |
| CAS | Computeralgebrasystem |
| CTML | Cognitive Theory of Multimedia Learning |
| DGS | Dynamische Geometrie-Software |
| HKM | Hessisches Kultusministerium |
| IBE | interaktives Bildschirmexperiment |
| ID | Identifikationsnummer |
| IRT | Item-Response-Theorie |
| KIM | Kurzskala intrinsischer Motivation |
| KMK | Kultusministerkonferenz |
| KTT | Klassische Testtheorie |
| LMS | Lernmanagementsystem |
| MR | Mixed Reality |
| NoS | Nature of Science |
| OER | Open Educational Resources |
| SAMR | Substitution Augmentation Modification Redefinition |
| SDDS | Scientific Discovery as Dual Search |
| SI | Scientific Inquiry |
| SWE | Selbstwirksamkeitserwartung |
| TPACK | Technological Pedagogical Content Knowledge |
| UGC | User-Generated Content |
| VR | Virtual Reality |
| XR | Extended Reality |

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|------------|
| Kurzfassung | III |
| Abstract | V |
| Danksagung | VII |
| Abkürzungsverzeichnis | IX |
| Inhaltsverzeichnis | XI |
| 1 Einleitung | 1 |
| 2 Modelle | 5 |
| 2.1 Modelle in der Kognitionspsychologie | 7 |
| 2.2 Modelle in der Wissenschaftstheorie..... | 10 |
| 2.3 Modelle im naturwissenschaftlichen Unterricht | 18 |
| 2.3.1 Modellkompetenz | 21 |
| 2.3.2 Modellierungskreisläufe | 26 |
| 2.4 Modelle in digitalen Medien..... | 29 |
| 2.4.1 Mathematische und grafikorientierte Modellbildung | 33 |
| 2.4.2 Dynamische Geometrie-Software | 38 |
| 3 Physikalische Modellbildung | 51 |
| 3.1 Kreislauf der Erkenntnisgewinnung..... | 54 |
| 3.1.1 Lernprodukte..... | 56 |
| 3.1.2 Lernschritte | 57 |
| 3.1.3 Lernmedien | 60 |
| 3.1.4 Dynamische Modelle..... | 62 |
| 3.1.5 Augmented Reality-Experimente..... | 64 |
| 3.2 Lernen mit Modellen und Experimenten..... | 70 |
| 3.2.1 Unterrichtsplanung | 71 |
| 3.2.2 Kompetenzen | 71 |
| 3.2.3 Beispiel zum Regenbogen | 72 |
| 4 Dynamische Modelle im Praktikum der Optik | 79 |
| 4.1 Forschungsfragen | 80 |
| 4.2 Studiendesign | 82 |
| 4.2.1 Lernumgebung | 83 |
| 4.2.2 Lerninhalt | 87 |
| 4.2.3 Stichprobe..... | 91 |
| 4.3 Methoden | 93 |

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|------------|
| 4.3.1 | Fachwissenstest zur Brechung | 95 |
| 4.3.2 | Selbstwirksamkeitserwartungen | 95 |
| 4.3.3 | Erfassung der Arbeit mit dem dynamischen Modell | 97 |
| 4.3.4 | Qualitative Inhaltsanalyse der Hypothesen | 102 |
| 4.3.5 | Motivation bei der Arbeit dem Modell | 104 |
| 4.3.6 | Erfassung der Durchführung des Experiments | 108 |
| 4.3.7 | Qualitative Inhaltsanalyse des Vergleichs von Modell und Experiment | 111 |
| 4.4 | Ergebnisse | 112 |
| 4.4.1 | Quantitativ erhobenen Merkmale | 113 |
| 4.4.2 | Qualitativ erfassten Merkmale | 118 |
| 4.4.3 | Zusammenhänge | 135 |
| 4.4.4 | Verhaltensmuster | 149 |
| 4.5 | Diskussion | 158 |
| 4.5.1 | Zusammenfassung und Interpretation | 158 |
| 4.5.2 | Einschränkungen | 165 |
| 4.5.3 | Gestaltungsempfehlungen | 168 |
| 5 | Optik mit Modellen und Experimenten | 179 |
| 5.1 | Anfangsoptik | 184 |
| 5.1.1 | Licht | 185 |
| 5.1.2 | Schatten | 192 |
| 5.1.3 | Spiegel | 198 |
| 5.2 | Geometrische Optik | 204 |
| 5.2.1 | Lochkamera | 205 |
| 5.2.2 | Fermatsches Prinzip | 207 |
| 5.2.3 | Brechung und Totalreflexion | 211 |
| 5.2.4 | Abbildungen an Linsen | 217 |
| 6 | Ausblick | 223 |
| | Literaturverzeichnis | 227 |
| | Abbildungsverzeichnis | 249 |
| | Tabellenverzeichnis | 253 |
| | Anhang | 257 |
| | Stichwortverzeichnis | 313 |
| | Lebenslauf | 315 |

In fact, equations are just the boring part of mathematics. I attempt to see things in terms of geometry. (S. 43)

Hawking (1988) nach Larsen (2005)

1 Einleitung

Wissenschaftliche Erkenntnisse helfen der Menschheit, die Herausforderungen zu meistern, denen wir im Laufe unserer Geschichte begegnen. Neben den verschiedenen Forschungsgebieten, in denen Lösungen vorgeschlagen werden, spielt die Forschung zum Lehren und Lernen der Naturwissenschaften eine nicht weniger wichtige Rolle. Denn gerade sie vermag es, jungen Menschen wissenschaftliches Denken näher zu bringen. Die Forschungsmethoden der Naturwissenschaften lehren uns, Meinungen darüber, wie sich die Dinge unter welchen Bedingungen entwickeln werden und warum, zu testen und in bewährtes Wissen zu verwandeln. Dieses Wissen wird in Form von wissenschaftlichen Modellen präsentiert, die regelmäßig verfeinert werden und als Grundlage für Vorhersagen und Entscheidungen dienen. Ein Verständnis darüber, wie wissenschaftliche Erkenntnisse gewonnen werden, ist für ihre Akzeptanz in der Gesellschaft unerlässlich.

Um wissenschaftliches Denken zu verinnerlichen, muss es von den Lernenden praktiziert werden. Diese Praxis wird mit Unsicherheiten und Rückschlägen verbunden sein, die jedoch notwendig sind, um neue Fähigkeiten zu entwickeln. Es ist z. B. anstrengender, nach dem Blick in eine Karte den richtigen Weg zu finden, als einer genauen Wegbeschreibung eines Navigationssystems zu folgen. Zuerst muss ein geistiges Bild von der Gegend geschaffen werden. Danach wird die Vorstellung mit den Beobachtungen verglichen und ggf. angepasst. In dem einen Fall wird das Ziel sicher und schnell erreicht, in dem anderen wird die Fähigkeit erworben, sich in einer zuvor unbekanntem Gegend zurecht zu finden. Dieses Beispiel verdeutlicht, wie Lernen und Kompetenzaufbau mit der geistigen Modellbildung zusammenhängen und wie wichtig es ist, geeignete Lernmedien auszuwählen.

Im Fach Physik sind Lernende insbesondere auf Modelle und Modellbildung angewiesen. Raufuß (1989) zählt nach Fruböse (2010) die Übertragung einer komplexen Realität in eine abstrakte Gedankenwelt als eine von vier „Barrieren“ auf, die „nirgendwo sonst“ so stark ausgeprägt sind wie im Physikunterricht (S. 390). In der Arbeit wird zunächst aufgezeigt, wie diese und andere Barrieren in der

1 Einleitung

Natur der naturwissenschaftlichen Erkenntnisgewinnung verankert sind (siehe Kapitel 2). Die Beschränktheit der menschlichen Wahrnehmung erfordert die Konstruktion und Verwendung von Vorstellungen, abstrakten Konzepten und Symbolen zur Beschreibung der uns umgebenden oder von uns in Gang gesetzten Prozesse. Solche Modelle haben zwar einen inneren, mentalen Ursprung, aber sie manifestieren sich in äußeren Repräsentationen, die im Unterricht als Sprache oder Lernmedien verschiedenster Art zum Einsatz kommen.

Auf diesen Überlegungen aufbauend wird ein Ansatz für den Physikunterricht vorgestellt, der das Ziel verfolgt, das wissenschaftliche Denken in den Mittelpunkt zu stellen. Erkenntnistheoretische Überlegungen und fachdidaktische Vorarbeiten werden zum didaktischen Konzept der *physikalischen Modellbildung* zusammengefasst (siehe Kapitel 3). Darin werden naturwissenschaftliche Unterrichtsinhalte gemäß dem *Kreislauf der Erkenntnisgewinnung* strukturiert, um ein Lernen mit Modellen und Experimenten zu ermöglichen. Die Demonstration eines Phänomens oder das Überprüfen von Gesetzmäßigkeiten mit einem Experiment haben bereits einen festen Platz im Physikunterricht. Um jedoch die Arbeit mit Modellen zur Formulierung von Hypothesen zu begünstigen, werden spezielle Lernmedien benötigt. In dieser Arbeit wird dafür die für den Mathematikunterricht entwickelte Dynamische Geometrie-Software (DGS) *GeoGebra* verwendet.¹ *GeoGebra* ermöglicht es, interaktive Lernmaterialien für verschiedene Themen mit einfachen Mitteln zu konstruieren, die die physikalischen Prinzipien dynamisch und damit auf Veränderungen reagierend visualisieren.

Als Repräsentationsform werden symbolische Darstellungen wie Diagramme, Schaltskizzen oder geometrische Konstruktionen in Betracht gezogen. Sie befinden sich auf einem niedrigeren Abstraktionsniveau als die dahinterliegende mathematische Modellierung, was die anfängliche Auseinandersetzung mit den physikalischen Inhalten erleichtert. Die Lernenden können mit *dynamischen Modellen* eigenständig arbeiten und individuelle mentale Modelle physikalischer Vorgänge aufbauen, ohne den mathematischen Formalismus oder die geometrische Konstruktion direkt beherrschen zu müssen. Darüber hinaus verfügen die mobilen Anwendungen von *GeoGebra* über eine Augmented Reality-Funktion (AR,

¹ Diese Schreibweise wird hier gegenüber anderen häufig anzutreffenden Varianten bevorzugt (z. B. „Dynamische Geometriesoftware“), da es sich strenggenommen um eine Software für *dynamische Geometrie* handelt – einen Zugang zu geometrischen Fragestellungen, der vor dem breitflächigen Einsatz von Computern entstanden ist und sich von der klassischen, statischen Elementargeometrie unterscheidet. Die alternative Schreibweise impliziert die Vorstellung einer dynamischen Software für Geometrie, was den mathematischen Kerngedanken ausblendet.

erweiterte Realität), was die Durchführung von *AR-Experimenten* ermöglicht. In AR-Experimenten werden an die reale Situation angepasste Modelle in das Experiment eingeblendet, um die visuelle Überprüfung der Modelle am Experiment zu ermöglichen.

Aus der dargelegten Struktur der naturwissenschaftlichen Erkenntnisgewinnung werden in Kapitel 3.1 Thesen abgeleitet, die als Leitlinien bei der Erstellung von Unterrichtsmaterialien dienen sollen. Alle Thesen können nicht im Rahmen dieser Arbeit empirisch untersucht werden. Stattdessen wird in Kapitel 4 ein spezifisches Anwendungsgebiet für dynamische Modelle aufgezeigt: Studierende arbeiten mit dynamischen Modellen in einer digitalen Lernumgebung, um sich auf einen Versuch im physikalischen Praktikum der Optik vorzubereiten. Im Zentrum der explorativen Untersuchung steht die Frage, wie die Studierenden mit dem Lernmedium umgehen. Um sie zu beantworten, werden einzelne Handlungen erfasst und übergeordnete Strukturen sowie spezifische Verhaltensmuster identifiziert. Des Weiteren wird geklärt, inwiefern und unter welchen Bedingungen Studierende im Speziellen und Lernende im Allgemeinen in der Lage sind, Hypothesen nach der Arbeit mit einem dynamischen Modell zu formulieren.

In Kapitel 5 werden anhand der Studienergebnisse abgeleitete Gestaltungsempfehlungen auf ein Unterrichtskonzept für die Optik der Sekundarstufe I angewendet, das auf der physikalischen Modellbildung basiert. Den Hauptteil bilden dynamische Modelle, die fachliche Konzepte der Anfangs- und der geometrischen Optik visualisieren, um sie in darauffolgenden Experimenten zu überprüfen. Ein wesentliches Merkmal des Unterrichtskonzepts ist die frühzeitige und strikte Trennung zwischen Konstruktion und Wahrnehmung.

Abschließend werden in Kapitel 6 umgesetzte Projekte und Perspektiven für Forschung und Anwendung der physikalischen Modellbildung mit dynamischen Modellen aufgezeigt.

2 Modelle

Der Begriff *Modell* ist im Alltag an vielen Stellen anzutreffen. Er hat je nach Kontext unterschiedliche Bedeutungen. Im deutschen Sprachgebrauch ist seine Verwendung laut dem Eintrag im „Deutschen Wörterbuch von Jacob und Wilhelm Grimm“ (1854) ausgehend von Künstlerkreisen im 16. Jahrhundert nach und nach verbreiteter geworden. Zusammenfassend lassen sich die in verschiedenen Wörterbüchern zu findenden Verwendungen und Unterbegriffe in vier Gruppen einteilen:

1. Verkürzte Abbildung eines bereits existierenden Originals wie z. B. ein Miniaturmodell eines Wahrzeichens einer Stadt
2. Nachzubildende Vorlage, Vorbild oder Muster für ein Produkt wie z. B. ein Architekturmodell oder ein Automodell als Bezeichnung für einen Typ
3. Von einem Künstler abzubildende Person für ein Gemälde oder Foto
4. Gedankliches Konstrukt

Die verschiedenen im Alltag gebräuchlichen Bedeutungen des Modellbegriffs finden sich wieder in dem von Mahr (2008) formulierten epistemischen Muster, in welchen Fällen einer Sache durch ein Subjekt das Modellsein zugeschrieben wird:

1. Ein Gegenstand, der etwas repräsentieren soll, stellt *als Objekt* ein Modell dar.
2. Als Abbildung eines Originals wird er als Modell *von etwas* aufgefasst, wenn er gewisse Anforderungen erfüllt.
3. Aus Beobachtungen am Modellobjekt werden Anforderungen *für etwas* abgeleitet, für das das Modell steht.

Die logische Reihenfolge sieht vor, dass zunächst Modelle hergestellt werden, die sich an einem Original orientieren. Bereits hergestellte Modelle werden von anderen Subjekten verwendet, um Kenntnisse über das Original zu erhalten (siehe Abbildung 1). Aufgrund dieser inbegriffenen Transportfunktion spielen Modelle vor allem als gedankliche Konstrukte eine Rolle in Erkenntnisprozessen, die in der vorliegenden Arbeit auf Unterrichtssituationen übertragen werden. Mittelstraß (2005) definiert Modelle als „Nachbildungen eines realen oder imaginären Gegenstandes mit dem Ziel, etwas über diesen oder mit diesem zu lernen“ (S. 65). Im Physikunterricht bildet das natürliche Phänomen den Gegenstand, der

2 Modelle

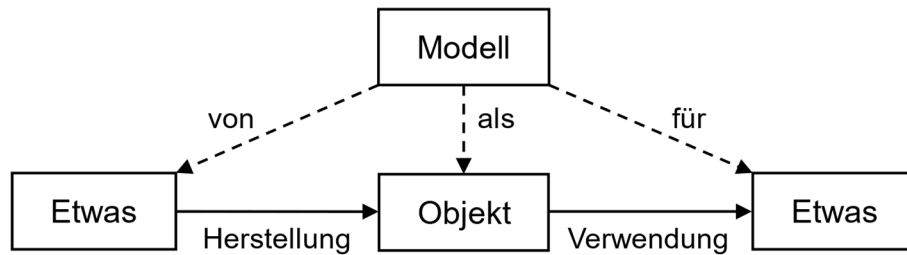


Abbildung 1: Epistemisches Muster nach Mahr (2008)

behandelt und von den Lernenden bewusst oder unbewusst mithilfe von Modellen verstanden wird. Die Notwendigkeit an dieser Stelle über Modelle zu sprechen, liegt in den natürlichen Grenzen der menschlichen Wahrnehmung: Viele Prozesse verfügen über eine unüberschaubare Komplexität oder spielen sich im Mikro- oder Makrokosmos ab. Damit liegen sie außerhalb unseres unmittelbaren Erfahrungsbereichs (dem Mesokosmos nach Vollmer, 1984), sodass eine Vereinfachung und Veranschaulichung komplexer Strukturen unumgänglich ist. In dieser Betrachtung des Modellbegriffs lassen sich Parallelen zu den von Stachowiak (1973) formulierten Merkmalen eines Modells feststellen: Ein Modell als Repräsentation eines Originals (Abbildungsmerkmal) muss nicht zwangsweise alle Attribute des Originals enthalten (Verkürzungsmerkmal), sondern nur die, die zu einer gewissen Zeit für eine gewisse Zielgruppe einem gewissen Zweck dienen (pragmatisches Merkmal). Daraus folgt die legitime Vorstellung, dass es verschiedene Modelle für ein Phänomen geben kann, die unterschiedlichen Zwecken dienen.

Diese Mehrdeutigkeit macht den Modellbegriff umso schwieriger für Lernende, die sich mit ihm entweder gar nicht oder nicht in angemessener Weise auseinandersetzen. Auch in der Fachdidaktik werden solche Begriffe wie *Modellbildung* und *Modellierung* synonym verwendet. Der auf die Konstruktion eines Modells beschränkte Prozess wird im Folgenden als Modellierung bezeichnet, während der Begriff Modellbildung einen umfassenderen Erkenntnisgewinnungsprozess mit Modellen betrifft, der im Zentrum dieser Arbeit steht.

Zunächst wird der Blick auf Modelle innerhalb von verschiedenen Disziplinen exemplarisch behandelt. In der Psychologie spielen Modelle als gedankliche Konstrukte eine wesentliche Rolle und geben einen Einblick darüber, wie Denkprozesse ablaufen (siehe Kapitel 2.1). In der Wissenschaft helfen Modelle als verkürzte Abbildungen eines Ausschnitts der Wirklichkeit, natürliche oder gesell-

schaftliche Prozesse zu beschreiben (siehe Kapitel 2.2). Als Konsequenz kommen Modelle in verschiedener Form im Unterricht vor (siehe Kapitel 2.3). Neben der Arbeit mit didaktisch aufgearbeiteten Modellen findet auch Modellierung als schrittweise Annäherung an das Phänomen mit digitalen Medien statt (siehe Kapitel 2.4).

2.1 Modelle in der Kognitionspsychologie

Die Kognitionspsychologie beschäftigt sich mit der Informationsverarbeitung während des menschlichen Denkens. Das Problemlösen als Untersuchungsgegenstand ist einer der Schlüssel zum Verständnis von Lernen und Wissen eines Individuums (Tobinski, 2017). Während einer Auseinandersetzung mit einem Problem werden *mentale Modelle* beruhend auf der Interaktion von Wahrnehmung und Gedächtnis konstruiert (Dutke, 1994, S. 12). Den Begriff verwendet Johnson-Laird (1983) für Repräsentationen der Wirklichkeit im Kopf. Das Lernen lässt sich im Einklang mit der zuvor erläuterten Transportfunktion von Modellen definieren als „Aufbau interner Modelle der Umwelt, die eine Transinformation auf eben diese Umwelt haben“ (Weltner, 1970, S. 115). Ein internes, mentales Modell wird als ein innerer Gegenstand verstanden, mithilfe dessen – aufgrund struktureller Ähnlichkeit zum Original – Aufgaben und Probleme stellvertretend und mental an diesem inneren Objekt gelöst werden können. Dank der mentalen Repräsentation werden Prozesse vor dem geistigen Auge simuliert, was dem Individuum ermöglicht, Prognosen zu machen und begründet zu handeln. Auch Physiker setzen sich mit den kognitiven Prozessen ihrer Arbeit auseinander. So spricht Hertz (1894) in diesem Zusammenhang von inneren Bildern:

Wir machen uns innere Scheinbilder oder Symbole der äußeren Gegenstände, und zwar machen wir sie von solcher Art, dass die denknotwendigen Folgen der Bilder stets wieder die Bilder seien der naturnotwendigen Folgen der abgebildeten Gegenstände. (S. 1)

Andererseits können aufgrund von Unterschieden in der Wahrnehmung und im Vorwissen verschiedene Aspekte desselben Sachverhalts unterschiedlich gewichtet werden, was zu individuellen mentalen Modellen und anderen Ergebnissen beim Problemlösen führt. Die Aufmerksamkeit wird dadurch gezielt auf bestimmte Lösungen gelenkt, während andere nicht in Betracht gezogen werden können (Moser, 2003, S. 188).

2 Modelle

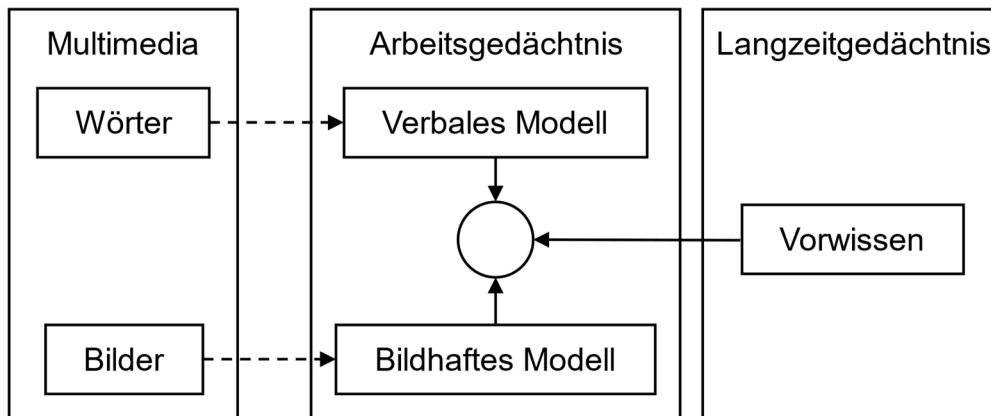


Abbildung 2: Vereinfachter Integrationsprozess verbaler und bildhafter Information in Form von mentalen Modellen und dem Vorwissen in der CTML nach Mayer (2005)

Die Annahme der aktiven Informationsverarbeitung als Konstruktion mentaler Repräsentationen während der Beschäftigung mit Lernmaterial findet sich auch in den Theorien zum multimedialen Lehren und Lernen wie z. B. in der Cognitive Theory of Multimedia Learning (CTML) nach Mayer (2005) wieder. Sensorischer Reize unterschiedlicher Kanäle führen in der CTML zu verbalen und bildhaften mentalen Modellen, die im Arbeitsgedächtnis verarbeitet werden. Einen wichtigen Schritt des multimedialen Lernens stellt die Integration des Vorwissens während der Konstruktion mentaler Modelle dar (siehe Abbildung 2). Außerdem wird auf Auswahlprozesse in der visuellen und auditiven Wahrnehmung sowie interne Organisationsprozesse auf dem Weg zu den mentalen Modellen verwiesen, die in Abbildung 2 vereinfacht wurden (gestrichelte Pfeile). Im integrativen Modell des Text- und Bildverständnisses nach Schnotz und Bannert (2003) wird nicht zwischen verbalen und bildhaften Modellen unterschieden, sondern zwischen visuell-räumlichen, mentalen Modellen und propositionalen Repräsentationen als einfache Informationseinheiten. Während mentale Modelle über direkte Analogiebeziehungen zu Bildern konstruiert werden können, bildet eine lesende Person aus der Textoberflächenstruktur zunächst propositionale Repräsentationen als inhaltliche Basis und konstruiert daraus schließlich ein mentales Modell des im Text beschriebenen Inhalts. Auch der umgekehrte Prozess findet statt: Das über visuelle Kanäle selektierte mentale Modell wird mit propositionalen Repräsentationen aus anderen Kanälen sowie dem Vorwissen abgeglichen und ergänzt. Sie stellen damit die parallele Bild- und Textverarbeitung in Frage, da be-

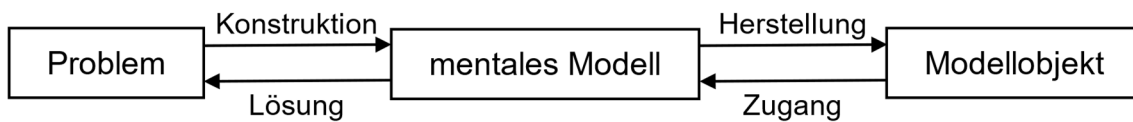


Abbildung 3: Beziehung zwischen einem realen Problem, dem mentalen Modell und dem realen Modellobjekt

schreibende und darstellende Repräsentationen unterschiedlichen Zwecken dienen und mentale Modelle nicht an bestimmte Wahrnehmungskanäle gebunden sind (Schnotz & Bannert, 2003, S. 142f).

Die exakten Strukturen der in unterschiedlichen Situationen individuell entwickelten mentalen Modelle sind für Außenstehende naturgemäß unbekannt. Erst wenn ein Sachverhalt einer anderen Person vermittelt oder zugänglich gemacht werden soll, findet die Herstellung realer *Modellobjekte* als neue äußere Gegenstände statt. Leisen (2005) thematisiert fünf Darstellungsformen, die im Unterricht bei der „Herstellung innerer Repräsentationen“ (mentaler Modelle) zur Verfügung stehen. Sie unterscheiden sich durch ihr Abstraktionsniveau: Zu der untersten Ebene werden (a) gegenständliche Darstellungen und Handlungen gezählt, zu denen auch das Experimentieren gehört. Auf der nächsthöheren Ebene stehen (b) bildliche Darstellungen, die neben Fotos auch vereinfachte Zeichnungen der Gegenstände enthalten können. Danach kommen (c) sprachliche Darstellungen, die durch Fachausdrücke geprägt sind, deren Bedeutung sich aus wissenschaftlichen Modellen ableitet. Das gilt noch stärker für (d) symbolische Darstellungen wie Diagramme, Schaltskizzen oder geometrische Konstruktionen. Auf der höchsten Abstraktionsebene werden schließlich (e) mathematische Darstellungen verortet, da die Mathematik sich einer eigenen, universellen Symbolsprache bedient. Je höher das gewählte Abstraktionsniveau ist, auf dem ein Sachverhalt dargestellt wird, desto höher sind die Anforderungen an die Lernenden. Der Autor empfiehlt Lehrkräften deshalb, einen Wechsel der Darstellungsformen in Abhängigkeit der individuellen Lernvoraussetzungen und des Lerngegenstandes zu vollziehen (S. 11). Welche Ausdrucksform gewählt wird und wie detailreich die Gestaltung ist, hängt somit gemäß dem pragmatischen Merkmal von Modellen nach Stachowiak (1973) von dem Zweck und der Zielgruppe ab, die mit dem Modellobjekt interagieren soll. Ein Modellobjekt und das zugehörige Modell, das der Gegenstand als Modellobjekt repräsentiert, teilen somit nicht dieselben Eigenschaften (Mahr, 2015, S. 331). Außerdem stellt bereits die Verbalisierung der ge-

2 Modelle

danklichen Lösung eines realen Problems den Herstellungsprozess eines Modellobjekts dar. Es ist nicht ausgeschlossen, dass dieser Prozess einen Einfluss auf das mentale Modell des Problems und der Lösung hat. Trotz allem wird durch die Beschäftigung mit dem realen Modellobjekt ein (wenn auch eingeschränkter) Zugang zum mentalen Modell eines Individuums ermöglicht, das seinerseits einer (unvollständigen) Konstruktion der Wirklichkeit entspricht (siehe Abbildung 3).

2.2 Modelle in der Wissenschaftstheorie

Die Vielfalt der Bedeutungen und Funktionen von Modellen in unterschiedlichen Kontexten erschweren eine einheitliche Definition. Mittelstraß (2005) schlägt Möglichkeiten zur *Klassifikation* vor und unterscheidet neben logisch-mathematischen und theoretischen Modellen zwischen Skalar- und Analogmodellen (S. 66). Diese Unterscheidung basiert auf der Art der Konstruktion der Modelle und ihrem Bezug zu dem Original:

1. Skalar: Vergrößerte oder verkleinerte Duplikate realer oder imaginärer Gegenstände
2. Analog: Vom Wesen her andere, aber strukturähnliche Gegenstände
3. Logisch-mathematisch: Symbolische Ausdrücke und abstrakte Strukturen

Außerdem unterscheidet er drei wesentliche *Funktionen* von Modellen:

1. Deskriptiv: Aufbereitung von Daten sowie Vermittlung zwischen Theorie und Realität
2. Formal: Konstruktion, Anwendung und anschließende Prüfung von Theorien
3. Normativ: Besseres Verständnis abstrakter Theorien und zu didaktischen Zwecken

Für die Unterscheidung wissenschaftlicher Modelle in deskriptiv-phänomenologische und formal-theoretische finden sich Beispiele in der Wissenschaftsgeschichte. Erstere gehen aus einem Modellierungsprozess hervor, der nach Wilholt (2005) Messungen und Beobachtungen als Grundlage hatte und wenig eigene theoretische Informationen enthält. Als Beispiel wird die Balmer-Formel als mathematischer Ausdruck angeführt, der das zuvor vermessene Spektrum des Wasserstoffatoms beschreibt. Das Gegenstück dazu ist Bohrs Atommodell, das theoretische Elemente wie die stabilen Elektronenbahnen formal postuliert, mit denen die phänomenologischen Gesetzmäßigkeiten bis zu einer gewissen Grenze erklärt werden können. Auch die Keplerschen Gesetze sind zunächst als

phänomenologische Beschreibungen der astronomischen Beobachtungen von Tycho Brahe zu verstehen. Später stellen sie sich als Lösungen des Gravitationsgesetzes von Newton für die theoretische Bewegung eines Körpers unter der Einwirkung einer Kraft heraus. Die dritte Variante der didaktisch-normativen Modelle liegt dann vor, wenn die grundlegenden Theorien und naturwissenschaftlichen Prinzipien in Modellen nicht mit dem Ziel der Prüfung verwendet werden, sondern um sie in der Anwendung an einem Beispiel zu vermitteln. Ihre Gültigkeit wird nicht mehr hinterfragt, das Modell erfüllt in diesem Fall eine Vorbildfunktion und ist in diesem Sinne normativ.² Typische Inhalte von Lehr-Lernmaterialien gehören zu dieser Klasse von Modellen, auch wenn sie nicht als Modelle gesehen oder bezeichnet werden. Die zuvor definierten wissenschaftlichen Modelle gehören in der Regel zu den formalen Modellen, die üblicherweise einen logisch-mathematischen Aufbau haben, wobei an vielen Stellen der Geschichte sowohl Analogien zu bereits erforschten Phänomenen (Analogmodelle) als auch phänomenologische Beschreibungen (deskriptive Modelle) den Erkenntnisprozess maßgeblich beeinflusst haben.

Die Unterscheidung von Modellen sowohl nach Konstruktion als auch nach Funktion erstreckt sich genauer betrachtet in einem Kontinuum, bei dem auf der einen Seite die natürliche Welt und auf der anderen Seite die Ideenwelt liegen (siehe Tabelle 1). Demnach lassen sich Modelle in Abhängigkeit der gewählten Klassifikation einerseits näher an der Natur im Sinne von wahrnehmbaren Dingen und andererseits näher an der Idee im Sinne von gedanklichen Konstrukten verorten. Harrison und Treagust (2000) formulieren ein ähnliches Spannungsfeld von *konkret* bis *abstrakt*. Ferner lassen sich reale Modellobjekte unabhängig von ihrer Konstruktion oder Funktion von virtuellen und mentalen unterscheiden. Als virtuelle Objekte können digital gespeicherte Informationen in Form von Symbolen oder grafischen Darstellungen verstanden werden, die weder komplett real sind noch ausschließlich als Gedankenkonstrukte vorliegen.³ Außerdem können Modelle unterschiedliche Repräsentationsformen annehmen (angelehnt an das EIS-Prinzip nach Bruner, 1974). Die im Modell repräsentierte Information kann durch Handlungen an einem 3D-Objekt erfahren werden (enaktiv), durch Bilder versinnbildlicht (ikonisch) und in Lehrsätzen und Gleichungen formuliert sein (symbo-

² Die in dieser Arbeit entwickelten und untersuchten dynamischen Modelle erfüllen diese Funktion (siehe Kapitel 3.1.4).

³ Fotos und Videos realer Objekte könnten als weitere Abstufung zwischen echten realen und gänzlich virtuellen Objekten aufgefasst werden, worauf der Übersicht halber verzichtet wurde.

2 Modelle

lich). Schließlich können Modelle in Abhängigkeit vom Inhalt des Originals unterschieden werden. Das Modell kann die reale Umgebung und mit den Sinnen wahrnehmbare Erscheinungen (intuitiv-natürlich) oder eher konstruierte Inhalte betreffen (wissenschaftlich-künstlich). Individuelle Hybridmodelle, in denen beide Arten unreflektiert vermischt werden, sind ebenfalls denkbar (persönlich-synthetisch). Eine ähnliche Unterscheidung konnte Ubben (2020) in einer Befragung zu Atommodellen anhand ihrer vermeintlichen Gestalt- bzw. Funktionstreue zum Original feststellen: Skalare und reale Replikate der Realität werden eher als gestalttreue Modelle wahrgenommen. Funktionstreue Modelle werden hingegen als Kodierung für ein abstraktes Wissen verstanden. Außerdem konnte wiederum eine Vermischung beider Verständnistypen mentaler Modelle beobachtet werden.

Tabelle 1 enthält zwar jeweils drei Repräsentanten einer Klassifikation, aber im Kontinuum sind mehr Abstufungen vorstellbar. Hinzu kommt, dass die übereinanderstehenden Begriffe nicht unbedingt zusammen in einem Modell vorkommen müssen, obwohl sie in ihrer individuellen Klassifikation im Vergleich an ähnlicher Stelle im Natur-Idee-Kontinuum verortet sind. Ein interaktives 3D-Planetenmodell in einer App beispielsweise ist ...

- *analog*, da es strukturähnlich zur realen Planetenbewegung ist, aber die Größenverhältnisse in der Regel nicht wiedergegeben werden,
- *normativ*, da es zu didaktischen Zwecken eingesetzt und nicht überprüft wird,
- *virtuell*, da es sich auf einem Bildschirm abspielt,
- *enaktiv*, da es in 3D-modelliert ist und die Animation gesteuert werden kann,

Tabelle 1: Klassifikation von Modellen im Natur-Idee-Kontinuum

| Klassifikation nach ... | Natur ←—————→ Idee | | |
|-------------------------|--------------------|-------------|------------|
| • Konstruktion → | skalar | analog | logisch |
| • Funktion → | deskriptiv | normativ | formal |
| • Objekt → | real | virtuell | mental |
| • Form → | enaktiv | ikonisch | symbolisch |
| • Inhalt → | natürlich | synthetisch | künstlich |

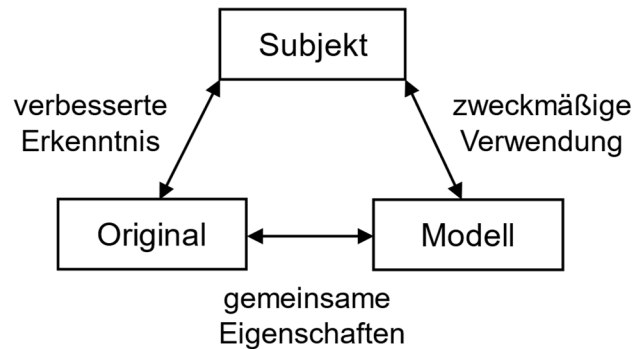


Abbildung 4: Beziehung zwischen dem Modell, dem Original und dem Subjekt nach Wüstneck (1963)

- *synthetisch*, da sich die Planeten nicht in der unmittelbaren Umgebung der Lernenden befinden, obwohl sie objektiv gesehen *natürlich* sind.

Diese Überlegungen zeigen auf, dass unabhängig davon, welche Art der Klassifikation von Modellen herangezogen wird, Eigenschaften betrachtet werden, die entweder einen Bezug zur Wahrnehmung haben oder von einer zunächst abstrakten Idee bestimmt werden. Letztere spielen im Rahmen der Erkenntnisgewinnung als theoretische Konstrukte, die praktische Vorhersagen liefern können, für unsere Wissensgesellschaft eine große Rolle. Bevor in den Naturwissenschaften von abstrakten, immateriellen Modellen realer Zusammenhänge gesprochen wurde, standen andere erkenntnistheoretische Werkzeuge wie Analogien, Bilder und reale Modellobjekte im Vordergrund (Epple, 2016, S. 30). Mit dem Blick der Kognitionspsychologie auf das menschliche Denken und Handeln drängt sich jedoch die Abhängigkeit wissenschaftlicher Erkenntnis von situativen Umständen und persönlichen Eigenschaften des forschenden Subjekts auf.

Zum Verständnis der Rolle von Modellen in der Wissenschaft betrachtet Wüstneck (1963) die Beziehung zwischen drei Komponenten: dem Modell, dem Original und dem Subjekt (siehe Abbildung 4). Das Modell wird demnach von einem Subjekt für einen bestimmten Zweck ausgewählt oder geschaffen und schließlich verwendet, um eine schrittweise Verbesserung der Erkenntnis über das Original zu ermöglichen. Die Voraussetzung ist, dass das Modell als „Repräsentant“ eines komplexen Originals gewisse Eigenschaften mit dem Original teilt (S. 1521ff). Sowohl das Original als auch das Modell können materieller oder immaterieller Natur sein. Das Maximalziel ist stets die Angleichung des Modells an das Original.

Im Allgemeinen ist die Beziehung zwischen Modell und Original jedoch dadurch gekennzeichnet, dass einige Eigenschaften des Originals (a) vernachlässigt, (b)

2 Modelle

mit anderen Bedeutungen belegt, (c) hervorgehoben oder (d) einige im Original nicht vorhandene Eigenschaften zum Modell hinzugefügt werden (Stachowiak, 1973, S. 139). Diese Prozesse lassen sich auch unter dem Wort *Idealisierung* zusammenfassen.⁴ Wenn jemand etwas im Alltag idealisiert, dann wird es einem Ideal angenähert, indem es vollkommener gesehen wird, als es ist. Bei diesem Prozess wird von der Unvollkommenheit der Wirklichkeit abgesehen. Wenn in der Wissenschaft von Idealisierungen gesprochen wird, dann geht es darum, sich einer komplexen Wirklichkeit anzunähern, indem einzelne Eigenschaften einer Sache idealisiert werden, also anders gesehen werden, als sie es sind, oder gänzlich ausgeschlossen werden. Bei diesem Prozess werden Annahmen gemacht, bei denen die Komplexität der Wirklichkeit bewusst vernachlässigt wird. Es muss stets abgewogen werden, wie viele Eigenschaften wie stark idealisiert werden können, sodass sich das Gesamtbild nicht allzu sehr von der Wirklichkeit unterscheidet.

Weisberg (2007) unterscheidet drei Arten von Idealisierungen:

1. Galileische Idealisierung: Notwendige Vereinfachungen für eine bessere Handhabung eines Phänomens
2. Minimalistische Idealisierung: Ausschließliche Betrachtung von Eigenschaften mit einem ausschlaggebenden Einfluss auf das Phänomen
3. Mehrfache Idealisierung: Alternative Modelle gegensätzlicher Art für dasselbe Phänomen

Als *Phänomene* werden im Allgemeinen bemerkenswerte Ereignisse verstanden, die unter bestimmten Umständen regelmäßig auftreten, Forschungsinteresse wecken und deshalb tiefgreifender untersucht werden müssen (Hacking, 1983, S. 221). Diese Beschreibung verleitet dazu, den Begriff zunächst nur mit Naturphänomenen zu assoziieren. Daneben existiert jedoch auch eine Welt der „produzierten Phänomene“ und diese „durch Wissenschaft und Technik erweiterte Wirklichkeit“ (Muckenfuß, 2001, S. 76) kann ebenfalls als Grundlage für ein Modell gesehen werden. Aus der Unterscheidung wird deutlich, dass das Subjekt im Rahmen der Erkenntnisgewinnung abwägen kann, welche und wie viele Eigenschaften wie stark idealisiert werden, sodass das Modell den individuellen Zweck erfüllt. Allerdings wird die erkenntnistheoretische Bedeutung von Idealisierungen

⁴ Im Gegensatz zu Idealisierungen verfolgen *Elementarisierungen* das Ziel, Lerninhalte in einer Unterrichtssituation adressatengerecht aufzubereiten. Sie bleiben den Lernenden in der Regel verborgen, wohingegen Idealisierungen im Lerngegenstand bereits enthalten sind.

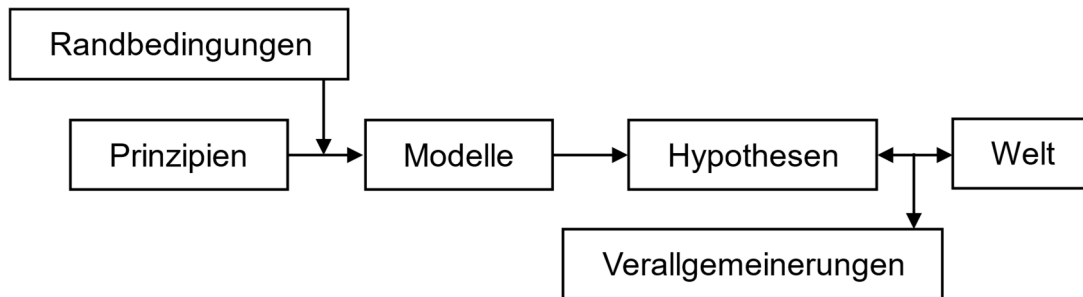


Abbildung 5: Wissenschaftliche Praxis nach Giere (2004)

unterschiedlich bewertet. Einerseits wird die Meinung vertreten, dass die Betrachtung der Idealisierungen eines Modells einen erheblichen Einblick in die ausschlaggebenden Eigenschaften des Phänomens geben kann (Strevens, 2017). Andererseits gibt es die Ansicht, dass idealisierte Eigenschaften zwar die Handhabung erleichtern, epistemischen Wert jedoch nur die näherungsweise wahren Komponenten eines idealisierten Modells haben (Sullivan & Khalifa, 2019, S. 677).

Im Gegensatz dazu wird die Rolle von Modellen in der Erkenntnisgewinnung aufgrund ihrer kognitiven Funktion in vielen wissenschaftstheoretischen Überlegungen herausgestellt (z. B. Frigg & Hartmann, 2020). Giere (2004) formuliert, dass Modelle durch die Anwendung abstrakter *Prinzipien* auf bestimmte Randbedingungen konstruiert werden (siehe Abbildung 5). Durch die Anwendung konstruierter Modelle auf die Welt werden im nächsten Schritt *Hypothesen* darüber generiert, inwiefern das jeweilige Modell mit bestimmten Aspekten der Welt übereinstimmt. Gelten die Hypothesen als bestätigt, können sie schließlich unter zuvor festgelegten Bedingungen verallgemeinert werden. Diese Beschreibung unterstreicht die Bedeutung von wissenschaftlichen Prinzipien als Aussagen über abstrakte Objekte, die nicht direkt beobachtet werden können, wie beispielsweise Kräfte und Massen in den Newtonschen *Axiomen* oder Lichtwege im Fermatschen Prinzip.⁵ Solche allgemeinen Prinzipien sind die Grundsteine der Modelle für einen bestimmten Ausschnitt der Wirklichkeit, wie die Schwingung eines Pendels oder die Entstehung eines Spiegelbildes. Die situationsbedingten Aspekte fließen als Randbedingungen in die Konstruktion der Modelle ein. Des Weiteren werden empirisch abgesicherte Erkenntnisse als Verallgemeinerungen von zuvor aufgestellten Hypothesen angesehen. Auf die Verwendung der Begriffe Theorie

⁵ Gemäß dieser Beschreibung wäre es passender von dem Aktions-, dem Trägheits- und Wechselwirkungsprinzip zu sprechen.

2 Modelle

und Gesetz wird in dieser Beschreibung explizit verzichtet, obwohl sie im wissenschaftlichen Sprachgebrauch vorkommen.

Daneben definiert Budin (1996) Modelle direkt als „theoriebeladene veranschaulichte komplexe Hypothesen“ (S. 196), die ein Wechselspiel zwischen theoretischer Überlegung und empirischer Überprüfung ermöglichen. Eine aufeinander abgestimmte Ansammlung bestimmter wissenschaftlicher Prinzipien könnte dennoch als *Theorie* aufgefasst werden. In diesem Sinne würden das Grundprinzip der klassischen Mechanik sowie das Trägheits- und Wechselwirkungsprinzip die Newtonsche Theorie ausmachen. Ob eine Theorie mehr ist als die Summe einzelner abstrakter Prinzipien, ist im Kontext eines bestimmten Modells zunächst unerheblich. Für die notwendige Unterscheidung von Modell und Theorie wird der Bezug zu empirischen Beobachtungen herangezogen: Modelle werden aufgrund ihrer Beschaffenheit auf bestimmte Situationen angewendet, Theorien dagegen nicht. Einschränkungen bzw. Randbedingungen, die zu einem konkreten Fall gehören, müssen in die an sich abstraktere Theorie eingefügt werden (Bailer-Jones, 2009, S. 3). Bailer-Jones (2009) definiert in diesem Zusammenhang *wissenschaftliche Modelle* als interpretative Beschreibungen von Phänomenen, die den Zugang zu den Phänomenen erleichtern.

Die bereits angesprochenen, durch Experimente gestützten und verallgemeinerten Zusammenhänge könnten als *Gesetze* bezeichnet werden, die mithilfe wissenschaftlicher Prinzipien aus Modellen abgeleitet und vielfach bestätigt wurden. Strenggenommen ist jedoch auch das Gravitationsgesetz ein Modell. Im Rahmen der allgemeinen Relativitätstheorie können manche Beobachtungen wesentlich genauer vorhergesagt werden, sodass hier ein anderes Modell herangezogen werden muss. Welches Modell für welche Fragestellung verwendet wird, hängt einerseits von der Komplexität des Modells und andererseits davon ab, ob das Modell passt und den gewünschten Anforderungen an die Genauigkeit genügt (Schäffler, 2019, S. 14). Lederman (2007) stellt den Unterschied zwischen Gesetzen und Theorien folgendermaßen heraus: Gesetze sind Aussagen über Beziehungen zwischen beobachtbaren Phänomenen, wie z. B. das Gesetz von Boyle-Mariotte, das den Druck eines Gases mit seinem Volumen bei konstanter Temperatur und Stoffmenge in Beziehung setzt. Theorien enthalten hingegen Erklärungen für beobachtbare Phänomene, wie auch die kinetische Molekulartheorie eine Erklärung für das Gesetz von Boyle-Mariotte liefert.

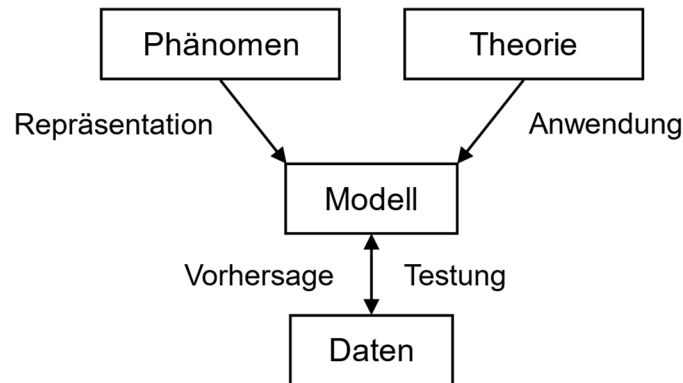


Abbildung 6: Beziehung von Phänomen, Theorie und empirischen Ergebnissen zu wissenschaftlichen Modellen

Neben all den wissenschaftstheoretischen Überlegungen sind Modelle und Simulationen nicht mehr aus der Praxis wegzudenken und haben sich bereits neben analytischen Theorien und realen Experimenten als dritte Säule des Erkenntniserwerbs etabliert (Bungartz, Zimmer, Buchholz & Pflügler, 2009). So charakterisiert u. a. Nersessian (2008) Modelle als Darstellungen von *Systemen* mit interaktiven Teilen und mit Darstellungen dieser Interaktionen. Schlussfolgerungen werden schließlich durch Erstellen und Manipulieren sowie Anpassen und Bewerten dieser Modelle gezogen. Notwendige Bestandteile eines Systems sind Elemente und eine Struktur, in der festgelegt ist, wie sich die Elemente gegenseitig beeinflussen (Bossel, 1989, S. 9). In dieser Beschreibung lassen sich Parallelen zu mentalen Modellen erkennen, in denen Prozesse vor dem geistigen Auge stellvertretend simuliert werden können. Im Allgemeinen wird als *Simulation* das Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierfähigen Modell verstanden, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind (VDI, 2014).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass Modelle in der Wissenschaft bestimmte Phänomene unter Anwendung von wissenschaftlichen Prinzipien bzw. Theorien sowie unter Berücksichtigung der Randbedingungen beschreiben und repräsentieren (siehe Abbildung 6). Für gewöhnlich werden die Phänomene in den Modellen idealisiert dargestellt, was so viel bedeutet, dass bei ihrer Konstruktion Vereinfachungen und Näherungen zugelassen werden. Es besteht auch die Möglichkeit, dass nur das Wesentliche eines Phänomens im Modell erfasst wird und als unwichtig erachtete Details weggelassen werden können. Durch Variation der im Zusammenhang stehenden Teile eines Modells werden Vorhersagen in Form von überprüfbareren Hypothesen abgeleitet. Danach werden die Modelle

2 Modelle

anhand empirischer Ergebnisse getestet. Dabei müssen sie nicht vollständig und in allen Aspekten richtig sein. Es sind verschiedene Modelle desselben Phänomens möglich, die unterschiedliche Funktionen erfüllen können. Die Auswahl des Modells hängt von seiner Funktion ab und sie liegt bei der anwendenden Person, die durch das Modell einen Einblick in das untersuchte Phänomen erhält. Dadurch helfen Modelle beim Verständnis der Welt und sind ein wesentliches Werkzeug in der aktuellen wissenschaftlichen Praxis.

2.3 Modelle im naturwissenschaftlichen Unterricht

Die Rolle von Modellen in der Wissenschaft führt unweigerlich dazu, dass sie Erwähnung in den deutschen Bildungsstandards für den Physikunterricht finden, der „Weltbegegnung durch die Modellierung natürlicher und technischer Phänomene und die Vorhersage der Ergebnisse von Wirkungszusammenhängen“ (KMK, 2005, S. 6) ermöglichen soll. Modelle werden dem Kompetenzbereich der Erkenntnisgewinnung zugeschrieben, der sich dadurch kennzeichnet, dass "experimentelle und andere Untersuchungsmethoden sowie Modelle“ genutzt werden (ebd., S. 7). Diese Aufspaltung suggeriert ein Nebeneinander von Experimenten, Modellen und anderen Untersuchungsmethoden, wobei ein adäquates Naturwissenschaftsverständnis die Vorstellung des Erkenntnisprozesses als zyklisches Wechselspiel von Modellieren und Experimentieren beinhaltet (Leisner-Bodenthin, 2006). Zudem ist die *induktive Methode* noch immer in der Unterrichtspraxis anzutreffen, bei der aus wenigen Messdaten allgemeine physikalische Gesetze unreflektiert abgeleitet werden. Kircher und Priemer (2020, S. 185) sehen darin nicht nur eine Manipulation, sondern auch den Grund für ein unzutreffendes Bild der naturwissenschaftlichen Forschung bei den Lernenden.

Ausgehend von wissenschaftstheoretischen Überlegungen ist das Lernen mit oder über Modelle stets im Fokus physikdidaktischer Entwicklung und Forschung gewesen. Kircher (1995) thematisiert die Sichtweise der Wissenschaftstheorie zur Beziehung zwischen dem Subjekt, dem Objekt (Original bei Wüstneck, 1963) und dem zugehörigen Modell. Schecker (1998) beschäftigt sich mit computergestützter Modellbildung und Mikelskis-Seifert (2002) evaluiert am Beispiel des Teilchenmodells einen Unterricht *über* Modelle. Die aufgeführte Literatur soll beispielhaft aufzeigen, dass Arbeiten mit unterschiedlichen Schwerpunkten zum Themenbereich *Modelle im Physikunterricht* gezählt werden können. Trotz allem werden Lernende in der Praxis selten mit Modellen als Werkzeugen der Erkenntnisgewinnung konfrontiert. Das führt unweigerlich dazu, dass sie Wissenschaft

nicht als Konstruktion von Modellen verstehen, die Phänomene der realen Welt repräsentieren sollen (Terzer & Upmeier zu Belzen, 2007, S. 51). Stattdessen dominiert die Vorstellung, dass es für einzelne Themen des Physikunterrichts bestimmte Modelle gibt, die selten hinterfragt werden (vgl. Treagust, Chittleborough & Mamiala, 2002; Trier & Upmeier zu Belzen, 2009). Zu solchen explizit als Modell bezeichneten Inhalten des Physikunterrichts gehören u. a. Atommodelle wie das Rutherfordsche oder Bohrsche Atommodell sowie das Teilchen- oder Wellenmodell des Lichts. In vielen Fällen wird das Wort *Vorstellung* synonym verwendet, sodass beispielsweise von einer Teilchenvorstellung gesprochen und das Wort Modell auf diese Weise gänzlich vermieden wird.

Da Lernen und Verstehen im kognitionspsychologischen Sinn individuelle Konstruktionsprozesse ausmachen, beschäftigt sich die Didaktik im Allgemeinen und die Physikdidaktik im Speziellen mit im Alltag verankerten Präkonzepten oder im Unterricht aufgebauten Denkmustern und Vorstellungen zu bestimmten Phänomenen. Die mentalen Repräsentationen (mentale Modelle) der Außenwelt werden dabei als *Schülervorstellungen* bezeichnet.⁶ Sie machen sich im Unterricht dadurch bemerkbar, dass Lernende zu Lösungen kommen, die im Einklang mit ihren eigenen Vorstellungen sind, in denen sich die Umwelt jedoch nicht immer in Übereinstimmung mit der naturwissenschaftlichen Sichtweise verhält. In der Forschung werden aus diversen Indizien Konstrukte erschlossen und als Klassen von „Vorstellungen über die Vorstellungen“ der Lernenden gesammelt (Schecker & Duit, 2018, S. 9), die bei der Unterrichtsgestaltung berücksichtigt werden sollten. Im konstruktivistischen Modell der didaktischen Rekonstruktion von Kattmann, Duit, Gropengießer und Komorek (1997) sind deshalb drei wechselwirkende Teilaufgaben vorgesehen:

- Fachliche Klärung
- Erfassung der Perspektive der Lernenden
- Didaktische Strukturierung

Lernen wird darin als aktive Modifizierung oder Rekonstruktion vorunterrichtlicher Vorstellungen und erworbener Konzepte angesehen. Während der didaktischen Strukturierung werden aus dem Vergleich der wissenschaftlichen Perspektive und der Sicht der Lernenden Leitlinien für den Unterricht entwickelt, die Korrespondenzen zwischen dem Fachwissen und individuellen Lernbedingungen beinhalten (Reinfried, Mathis & Kattmann, 2009). Dennoch muss in der jeweiligen

⁶ Im Folgenden wird geschlechtsneutral von den Vorstellungen der Lernenden gesprochen.

2 Modelle

Situation beachtet werden, dass die mentalen Modelle von der individuellen Informationsverarbeitung abhängen und in der Lerngruppe nicht homogen sind. Außerdem könnten Lernende neue Informationen in bereits vorhandene Strukturen einbauen und je nach Kontext unterschiedliche Wissens Elemente aktivieren. Vosniadou (2012) verwendet für diese Art der aus verschiedenen Quellen zusammengesetzten Vorstellungen den Begriff *synthetische Modelle*.

Neben individuellen mentalen Modellen ist jedes im Physikunterricht behandelte natürliche oder technische – „von der Wissenschaft Physik hervorgebrachte“ (Muckenfuß, 1995, S. 151) – Phänomen in eine Theorie eingebettet oder wird mit einem wissenschaftlichen Modell beschrieben. Den Lernenden bleibt der hypothetische Charakter des Wissens jedoch oft unbewusst (Höttecke, 2001). Um dem entgegenzuwirken, werden von Thiele, Mikelskis-Seifert und Wünsch (2005) folgende Unterrichtstätigkeiten vorgeschlagen:

1. Hypothesen formulieren, mit dem Modell Prognosen erstellen und sie mit der Wirklichkeit vergleichen
2. Gültigkeit des Modells hinterfragen, Grenzen des Modells aufzeigen und über die eigene Vorgehensweise reflektieren (S. 36)

Damit sich die entsprechenden Vorstellungen zur Erkenntnisgewinnung mit der *deduktiven Methode* durchsetzen, muss das Vorgehen kontinuierlich und systematisch im Unterricht – über verschiedene Themen und naturwissenschaftliche Fächer hinweg – praktiziert werden (Mikelskis-Seifert, 2010, S. 2f). Es wird eine Erweiterung der philosophischen Grundhaltung der Lehrenden um die Vorstellung von Modellen als Untersuchungsinstrumente gefordert, in denen Theorie und Phänomen oder vielmehr Theorie und experimentelle Ergebnisse in Einklang gebracht werden (Koponen, 2007, S. 768f).

Die fachdidaktische Forschung beschäftigt sich deshalb mit der Definition und Einschätzung der Modellkompetenz der Lehrenden und Lernenden (siehe Kapitel 2.3.1). Um die *Modellmethode* zu beschreiben und den Lernenden bzw. dem Unterricht durch entsprechende Lernschritte eine passende Struktur zu geben, werden in den Fachdidaktiken außerdem Modellierungskreisläufe formuliert (siehe Kapitel 2.3.2).

2.3.1 Modellkompetenz

Neben der Beschreibung eines naturwissenschaftlichen Unterrichts, der die Konstruktion und Anwendung von Modellen beinhaltet, sind Definitionen und Dimensionen der zu fördernden Kenntnisse und Fähigkeiten der Lernenden von Interesse. Sie sind in den Bereich zu verorten, der das Wissen über die Natur der Naturwissenschaften (Nature of Science, NoS) bzw. die Fähigkeiten naturwissenschaftlicher Erkenntnisgewinnung (Scientific Inquiry, SI) umfasst (Lederman, 2007). Es geht um das Verständnis von Theorien als Werkzeugen der Erkenntnisgewinnung und ihrer Rolle bei der Beobachtung und Interpretation von experimentellen Ergebnissen. Das Verständnis von Modellen als theoretische Beschreibungen naturwissenschaftlicher Phänomene und ihrer Rolle bei der Ableitung von Prognosen und Hypothesen steht damit in einem engen Zusammenhang. Als *Modellkompetenz* wird daher in Anlehnung an den Kompetenzbegriff von Weinert (2001) ein System aus Kenntnissen und Fähigkeiten zur Bewältigung von Anforderungen im Umgang mit naturwissenschaftlichen Modellen bezeichnet: Zum deklarativen Wissen gehört das allgemeine Modellverständnis als Teil des Wissenschaftsverständnisses und Kenntnisse über die Eigenschaften bestimmter Modelle. Zum prozeduralen Wissen gehört die Reflexion der Modellmethode und die Anwendung eines bestimmten Modells zur Erklärung von Phänomenen (Leisner-Bodenthin, 2006, S. 93f).

Schwarz et al. (2009) teilen Kenntnisse und Fähigkeiten in zwei Dimensionen auf und formulieren jeweils vier Stufen der Kompetenzentwicklung (learning progression). Die erste Dimension betrifft den allgemeinen Charakter von Modellen als Werkzeugen der Erkenntnisgewinnung und die zweite den veränderlichen Charakter von Modellen im Zusammenhang mit der Erweiterung des eigenen Wissenshorizonts. Die Kompetenzentwicklung ist hier eng an den Modellierungsprozess im Unterricht gebunden und wird anhand von Skizzen und Äußerungen der Lernenden erfasst. Auf den unteren Stufen werden Modelle als Illustrationen, Gedankenstützen oder Erklärungen einzelner Phänomene aufgefasst, die entweder endgültig sind oder nur durch äußere Informationsquellen erweitert werden können. Zudem verbleiben die Erklärungen hauptsächlich auf der phänomenologischen Ebene. Auf den oberen Stufen sind die Lernenden in der Lage, eigenständig zu modellieren, ihre Modelle zu hinterfragen und zu erweitern. Die Modelle enthalten zunehmend theoretische Elemente, die sich der direkten Wahrnehmung entziehen. Die Kompetenzentwicklung entspricht damit einer Verschie-

2 Modelle

bung im Natur-Idee-Kontinuum in Richtung der Idee (siehe Kapitel 2.2). Die Forschenden gehen davon aus, dass sich die Dimensionen in der Praxis gegenseitig beeinflussen: Das Verständnis, wie und warum sich Modelle ändern, hängt mit dem Verständnis zusammen, dass Modelle nützliche Erklärungen für wissenschaftliche Phänomene liefern (Schwarz et al., 2009, S. 652).

Zur weiteren Strukturierung der Modellkompetenz sind fünf Teilkompetenzen und drei Niveaustufen für den Biologieunterricht aus der Literatur abgeleitet (Upmeier zu Belzen & Krüger, 2010) und empirisch untersucht worden (Krell, 2013). Bei den Teilkompetenzen werden wiederum Kenntnisse über Modelle und Fähigkeiten zur Modellbildung unterschieden. Zu den Kenntnissen gehören die zwei bereits erläuterten Fragen nach der Beziehung zwischen dem Original und dem Modell (Eigenschaften von Modellen) und der Existenz unterschiedlicher Modelle zu einem Original (alternative Modelle). Zur Modellbildung gehören die verschiedenen Arten des Einsatzes von Modellen (Zweck von Modellen) sowie die Fähigkeiten zu ihrer Überprüfung und Überarbeitung (Testen von Modellen, Ändern von Modellen). Als Grundlage der Unterscheidung von Niveaustufen innerhalb der fünf Teilkompetenzen werden die drei Ansichten des Modellseins nach Mahr (2008) herangezogen:

- *Modell als Objekt*: Modelle sind gegenständliche und direkte Kopien der realen Welt.
- *Modell von etwas*: Modelle dienen der idealisierten Repräsentation eines Originals.
- *Modell für etwas*: Modelle werden als theoretischen Rekonstruktionen zur Erkenntnisgewinnung eingesetzt.

Im Gegensatz zu Schwarz et al. (2009) gehen die Forschenden nicht von einer Kompetenzentwicklung entlang der unterschiedenen Stufen aus. Außerdem deutet sich in der Studie von Krell (2013) anhand von Testaufgaben zu Biologiemo-
dellen eine fünfdimensionale Struktur an, sodass für die Praxis eine Schwerpunktsetzung auf einzelne Teilkompetenzen empfohlen wird. Allerdings erfolgte die Erhebung der Kompetenzen, die im Kompetenzmodell als Fähigkeiten eingeordnet wurden, nicht über etwaige Modellierungsaufgaben, sondern über eine kenntnisbasierte Auswahl von Aussagen bezüglich präsentierter Modelle.

In allgemeineren Kompetenzmodellen zur Erkenntnisgewinnung unterscheiden Gehlen (2016) für die Chemie und Straube (2016) für die Physik zwischen naturwissenschaftlichen Untersuchungen in Form von Experimenten, der Modellbil-

derung und den Fähigkeiten zur wissenschaftstheoretischen Reflexion. Als Modellbildung wird hier der Bestandteil bezeichnet, der die Modellmethode als Teil des naturwissenschaftlichen Arbeitens beinhaltet. Die Ergebnisse der entwickelten Kompetenztests sind bezüglich der Aufteilung der Erkenntnisgewinnung in drei unabhängige Bereiche jedoch nicht eindeutig. Die grundsätzliche Möglichkeit, den Kompetenzbereich der Erkenntnisgewinnung mit schriftlichen Tests abzudecken, mit denen die Qualität des naturwissenschaftlichen Arbeitens nicht erfasst werden kann, steht auch hier zur Diskussion.

In der Physikdidaktik wird Modellkompetenz auch im Hinblick auf Unterrichtsvorschläge diskutiert, die sich von einem als modellbasiert angesehenen Unterricht abgrenzen.⁷ Westphal (2014) führt Modellfreiheit bzw. Modellkompetenz als Aspekt eines phänomenbasierten Physikunterrichts aus. Ein Modell darf demnach weder Ausgangspunkt noch Ziel der Erkenntnisgewinnung im Unterricht sein. Erst nachdem sich Lernende der Phänomene bewusst geworden sind, können elementarisierte Erklärungen und Mathematisierungen eingeführt werden. Bei den Erklärungen wird jedoch darauf geachtet, dass keine hypothetischen Annahmen über Vorgänge gemacht werden, solange es nicht nötig ist. Wenn Konzepte nötig werden, die über die reine Beobachtung hinausgehen, wird dann auf beschreibende und langfristig tragfähige Modelle gesetzt wie das Fermatsche Prinzip im Lichtwegkonzept (Erb, 1994; Schön et al., 2003). Die Besonderheit eines phänomenbasierten Unterrichts liegt deshalb nicht in der Ablehnung von Modellen, sondern in einem bewussten und reflektierten Umgang mit ihnen. Gelingt das nicht, besteht die Gefahr, dass abstrakte Begriffe und konstruierte Modelle missverstanden werden. Sie könnten als materielle Ursachen aufgefasst werden, was Wagenschein (1976) als ontologisches Missverständnis der Physik bezeichnet. Mit einem solchen Modellverständnis wäre es beispielsweise angemessen zu behaupten, Licht *ist* eine Welle mit all den Eigenschaften einer materiellen Welle und kann nicht nur bei Bedarf mathematisch in einem Modell als Welle beschrieben werden. Grusche (2018a) macht einen Vorschlag, wie im Unterricht weder die Phänomene noch die Modelle vernachlässigt werden können, indem er die phänomenologische und die Modellmethode zusammenführt. In der *phänomenbasierten Modellmethode* folgt auf die Schritte zum Beschreiben, Erkunden und Darstellen des Phänomens die Entwicklung, Anwendung und Bewertung eines passenden Modells.

⁷ Dazu werden u. a. die Unterrichtslehrgänge von Wagenschein (2009), die modellfreie (Mackensen & Ohlendorf, 1998) und die phänomenologische Optik (Grebe-Ellis, 2005) gezählt.

2 Modelle

Vor diesem Hintergrund und der Tatsache, dass im Physikunterricht der Fokus auf gegenständliche Modelle, die als direkte Kopien wahrgenommen werden könnten, nicht so groß ist wie im Biologieunterricht, wird als Grundlage der Operationalisierung eines naiven Modellverständnisses anstelle der Modell-als-Objekt-Vorstellung eine alternative Formulierung vorgeschlagen (Teichrew & Erb, 2018a, S. 799):

- *Modell als Erklärung*: Modelle geben das Wesen und die Ursachen der Vorgänge in der realen Welt vollständig und alternativlos wieder.

Als Modelle werden in diesem Fall alle schultypischen Beschreibungen und Visualisierungen von Phänomenen verstanden.⁸ Es kann sich um Texte, Skizzen, Abbildungen, Objekte, Gleichungen oder Simulationen handeln, die den Lernenden ein Phänomen erklären sollen. Windschitl und Thompson (2006) gehen davon aus, dass Lernende die Eigenschaften und den Zweck von Modellen nicht verstehen können, wenn Lehrende Modelle als unproblematische Darstellungen realer Strukturen oder Prozesse ansehen (S. 817). Ihre Studie hat gezeigt, dass angehende Lehrende, die den hypothetischen Charakter von Modellen erkennen, ihnen in ihren Unterrichtsplänen diese Rolle eher zuschreiben als umgekehrt. Um die Modellkompetenz der Lernenden zu fördern, sollten deshalb unvoreingenommene Beschreibungen der Phänomene den Ausgangspunkt bilden und Modelle deutlicher als Werkzeug der Erkenntnisgewinnung und nicht zur reinen Erkenntnisvermittlung und -formulierung verwendet werden.

Tabelle 2 enthält Beispielaussagen zu jeder Teilkompetenz in drei Arten des Modellverständnisses. Die erste Art sticht durch den Wunsch heraus, Erkenntnisse uneingeschränkt zu formulieren. Es wird davon ausgegangen, dass Modelle fehlerfrei sein müssten und alle Eigenschaften des Originals enthalten, das mit dem Modell alternativlos erklärt wird. Die zweite Art zeichnet sich durch das Verständnis aus, dass Modelle verkürzte Abbildungen des Originals sind. Sie teilen mit dem Original so viele Eigenschaften wie möglich und sind deshalb dafür geeignet, das Original zumindest teilweise zu beschreiben. Die dritte Art bezieht darüber hinaus das Subjekt in die Beziehung zwischen Modell und Original mit ein, das je nach Fragestellung pragmatisch über den Konstruktionsprozess und die

⁸ Genau genommen handelt es sich um Modellobjekte (siehe Kapitel 2.1). Allerdings wird auf eine Eingrenzung verzichtet, solange sich die Aussagen bezogen auf mentale Modelle oder Modellobjekte prinzipiell nicht unterscheiden.

Anforderungen an das Modell entscheidet. Die verwendeten Modelle sollten in der Lage sein, das Original innerhalb von selbstgewählten Grenzen empirisch angemessen abzubilden.

Tabelle 2: Drei Arten des Modellverständnisses mit Beispielaussagen zu den fünf Teilkompetenzen angelehnt an Upmeyer zu Belzen und Krüger (2010) nach Teichrow und Erb (2018a)

| | | Modellverständnis | | |
|-------------------------------|--------------------------------------|--|---|--|
| | | Modell als Erklärung (Erkenntnis- vermittlung) | Modell als Beschreibung (Erkenntnis- formulierung) | Modell als Werkzeug (Erkenntnis- gewinnung) |
| Eigenschaften von Modellen | | Ein Modell ... liefert die Erklärung für ein Phänomen. | bildet ein Phänomen idealisiert ab. | ist ein theoretisches Konstrukt für ein Phänomen. |
| Alternative Modelle | | Alternative Modelle eines Phänomens ... | | |
| Zweck von Modellen | | liefern andere Erklärungen des Phänomens. | bilden das Phänomen auf andere Weise ab. | werden für andere Fragestellungen entwickelt. |
| Teilkompetenzen | Testen von Modellen | Modelle erlauben ... | | |
| | Ändern von Modellen | Phänomene zu verstehen. | Beobachtungen zu interpretieren. | Prognosen für zukünftige Beobachtungen zu machen. |
| | | Modelle werden dahingehend überprüft, ob ... | | |
| | ihre Erklärungen richtig sind. | sie die Beobachtungen abbilden. | sich ihre Hypothesen durch Experimente stützen lassen. | |
| | Modelle werden geändert, wenn sie... | | | |
| | nicht richtig gemacht wurden. | nicht alle Beobachtungen abbilden. | eine Fragestellung nicht beantworten können. | |

2 Modelle

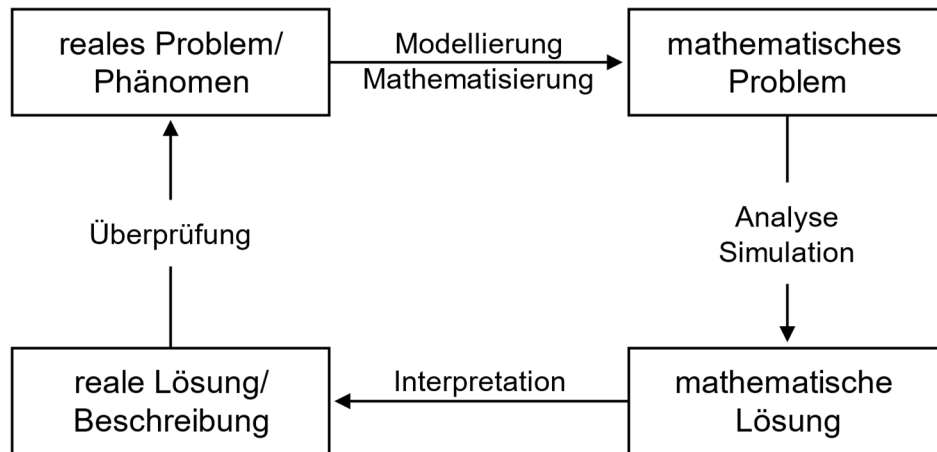


Abbildung 7: Modellierungsprozess nach Ortlieb (2004)

2.3.2 Modellierungskreisläufe

Schrittweise Darstellungen des Modellierungsprozesses stellen selbst Modelle dar und werden idealisiert als Kreisläufe dargestellt. Modellierungskreisläufe spielen im Bereich der angewandten Mathematik eine große Rolle und helfen dabei, reale Probleme in logisch-mathematische Modelle zu übersetzen und mathematische Lösungen zu erhalten. In der schulischen Praxis wird sich häufig mit dem Ergebnis nach dem ersten Durchlauf zufriedengegeben, bevor es mit dem nächsten Modellierungsproblem weitergeht. Trotzdem eignen sich die Kreislaufdarstellungen als Stütze beim mathematischen Modellieren, und um Lernenden den iterativen Modellierungsprozess als Metawissen näherzubringen (Greefrath, Kaiser, Blum & Borromeo Ferri, 2013).

Ortlieb (2004) stellt die aktive Rolle der Mathematik im naturwissenschaftlichen Erkenntnisprozess heraus. Er formuliert einen Kreislauf, bei dem ein reales Problem mathematisch modelliert wird, um eine mathematische Lösung zu erhalten, die anhand der realen Lösung überprüft wird (siehe Abbildung 7). Er appelliert, die Modellmethode, mit der physikalische Erkenntnisse gewonnen werden, im Physikunterricht zu thematisieren und sich nicht auf Experimente zu beschränken. Er warnt damit vor einem naiven Empirismus, bei dem Erkenntnisse nur durch Beobachtung und Experiment gewonnen werden, aus denen sich über Generalisierungen schließlich Gesetzmäßigkeiten ableiten (induktive Methode, siehe Kapitel 2.3). Experimente lassen sich zwar ohne die dazugehörigen mathematischen Vorüberlegungen nicht begründen, es wäre aber auch keine Lösung, sich auf Lehrbuchwissen und Computersimulationen zu beschränken und

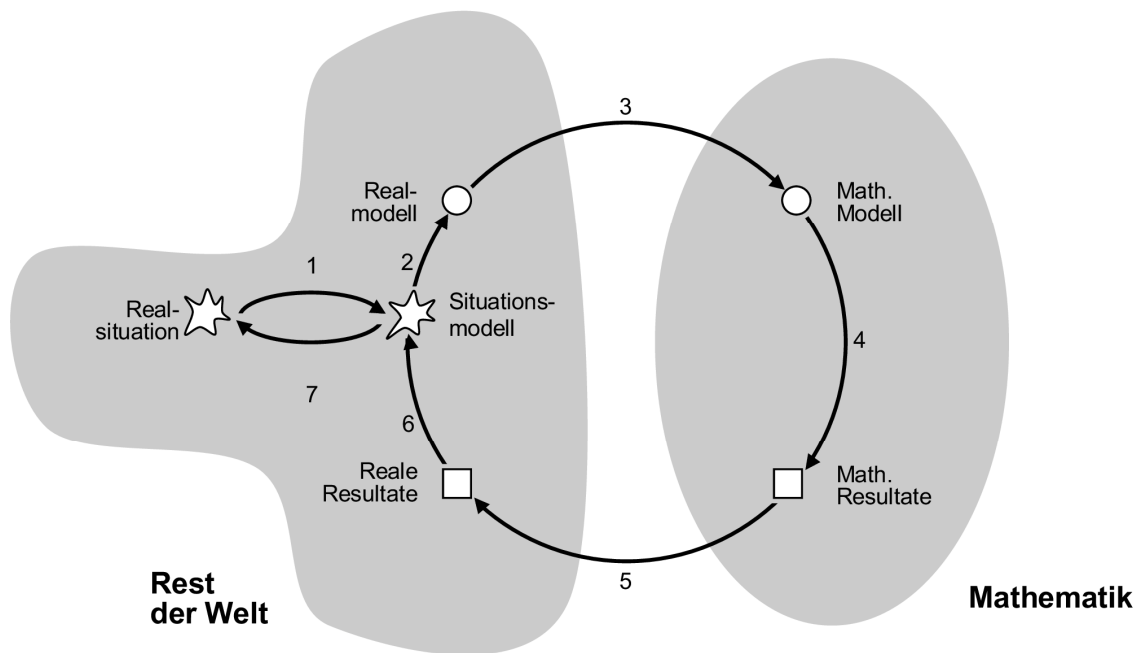


Abbildung 8: Modellierungsprozess nach Blum und Leiß (2005)

auf Experimente zu verzichten (Ortlieb, 2004, S. 38). Aktuell wird in der Mathematikdidaktik das komplexere Modell von Blum und Leiß (2005) verwendet, das neben Realsituation und Mathematik das Situationsmodell als mentale Repräsentation der Realität einschließt (siehe Abbildung 8). Es besteht aus den folgenden Schritten: (1) verstehen, (2) vereinfachen/strukturieren, (3) mathematisieren, (4) mathematisch arbeiten, (5) interpretieren, (6) validieren und (7) vermitteln. Der Kreislauf beschreibt den erwarteten bzw. gewünschten Umgang der Lernenden mit Modellierungsaufgaben, die auch in naturwissenschaftlichen Fächern wie Chemie Anwendungen finden (Goldhausen & Di Fuccia, 2020). Die Motivation, Modellierungsaufgaben zu behandeln, besteht darin, durch Realitätsnähe Lernenden den Nutzen der Mathematik näherzubringen sowie das Aufstellen mathematischer Modelle und ableiten mathematischer Resultate zu erleichtern. Diese werden in den nachfolgenden Schritten direkt an dem ursprünglichen Situationsmodell bzw. der geschilderten Realsituation gemessen. Normalerweise wird reflektiert, ob die mathematischen Resultate plausibel erscheinen. Eine gezielte und unabhängige Überprüfung der Modellergebnisse im Sinne eines realen Experiments ist in den geschilderten Darstellungen nicht vorgesehen und selbst für einen anwendungsorientierten Mathematikunterricht auch nicht zielführend. Für den Physikunterricht bietet es sich jedoch an, mathematische Modelle physikalischer Phänomene für das Ableiten von Modellergebnissen als Hypothesen zu nutzen, die im Anschluss mithilfe eines Experiments überprüft werden. Da der

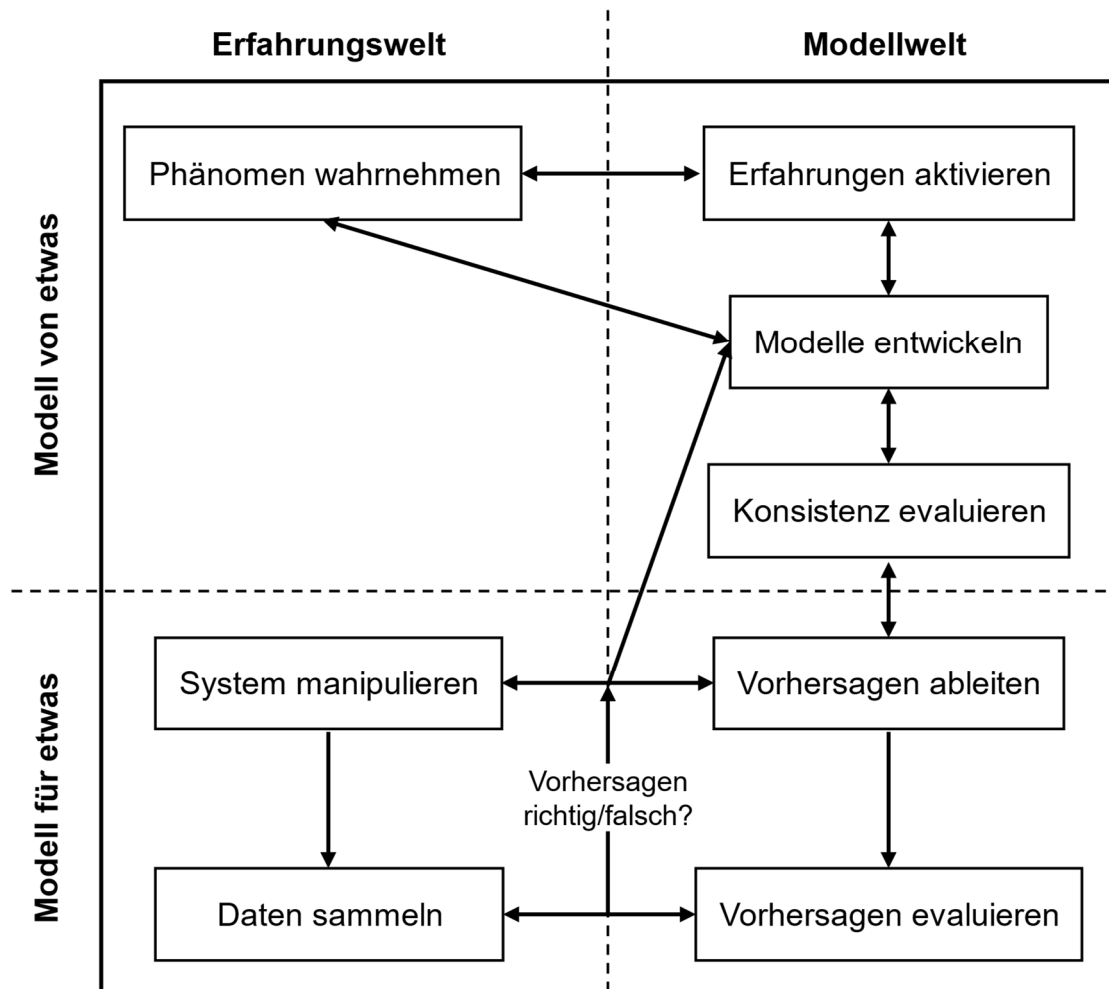


Abbildung 9: Naturwissenschaftliche Erkenntnisgewinnung nach Krell et al. (2016, 2019)

Physikunterricht in erster Linie für ein breiteres Verständnis physikalischer Phänomene und nicht für verbesserte mathematische Fähigkeiten verantwortlich ist, sollten neben hergeleiteten Formeln und aufgestellten Gleichungen zu diesem Zweck auch Visualisierungen und Simulationen genutzt werden (siehe Kapitel 3.1).

Krell, Upmeier zu Belzen und Krüger (2016) beschreiben naturwissenschaftliche Erkenntnisgewinnung literaturbasiert als einen Modellierungsprozess, der mit der Wahrnehmung eines Phänomens beginnt (siehe Abbildung 9 in einer eingedeutschten Variante nach Krell, Walzer, Hergert & Krüger, 2019). Erfahrungsba-
 siert wird ein erstes Modell entwickelt und evaluiert, das relevante Teile des Systems repräsentiert. Das auf diese Weise entstandene Modellobjekt soll das Phänomen als Medium erklären können (Modell von etwas). Außerdem können durch das Modell Vorhersagen darüber abgeleitet werden, wie sich das System

unter bestimmten Bedingungen verhält, die durch Experimente und Manipulationen am System überprüft werden (Modell für etwas). Infolgedessen wird das Modell entweder bestätigt oder es muss abgelehnt bzw. geändert werden, sodass der Prozess von vorne beginnt.

Die Darstellung entspricht der wissenschaftstheoretischen Einordnung des Modellbegriffs und unterstreicht durch den unteren Bereich, dass Modelle nicht nur als Medien im Unterricht auftreten, sondern auch zur Ableitung überprüfbarer Vorhersagen genutzt werden sollten. Es schafft theoretisches Verständnis über die Erkenntnisgewinnung und erlaubt, unterrichtliches Handeln der Lehrenden beim Umgang mit Modellen zu klassifizieren und zu analysieren (Krell et al., 2019).

2.4 Modelle in digitalen Medien⁹

Der Einsatz digitaler Medien im Unterricht hat den Anspruch, das Lehren und Lernen zu verbessern. Mit einer Vielzahl von Anwendungen und Online-Tools soll eine allgemeine Steigerung der Effizienz oder Erleichterung der Kommunikation im Lernprozess erreicht werden (vgl. Hirsch, 2020). Zu den Vorteilen digitaler Lernmedien zählt u. a. die Einbindung von Bildern, Grafiken oder Tonaufnahmen, die Gestaltung motivierender Lernumgebungen durch spielerische Ansätze sowie orts- und zeitunabhängiges Lernen durch die flexible Nutzung von Online-Lernaktivitäten (Schaumburg & Prasse, 2019, S. 159).

Die Physikdidaktik beschäftigt sich schon lange mit dem Einsatz von Multimedia, neuen oder digitalen Medien, die Lösungen für bestimmte fachdidaktische Herausforderungen liefern können. Multimedia bzw. multimediales Lernen unterstreicht verschiedene Kanäle der Wahrnehmung (Multimodalität), mehrere Darstellungsarten (Multicodierung) und Interaktivität. Die Bezeichnung neue Medien hebt aktuelle Informationen sowie Hard- und Software hervor. Digitale Medien grenzen sich von klassischen oder analogen Medien ab, die keine Computertechnik voraussetzen (Girwitz, 2020a, S. 459f). Jeder Begriff zielt somit auf bestimmte Merkmale von Unterrichtsmedien ab, die jedoch in vielen Fällen gleichzeitig auftreten, sodass eine klare Grenze nicht gezogen werden kann.

Neben den von Shulman (1987) formulierten drei Wissensarten für Lehrkräfte (allgemeindidaktisches Wissen, fachliches Wissen und fachdidaktisches Wissen)

⁹ Dieses Kapitel enthält Abschnitte, die der Argumentation bereits publizierter Beiträge folgen (vgl. Teichrew & Erb, 2018b, 2020a).

2 Modelle

spielt im Zuge dieser Entwicklungen das Wissen rund um digitale Medien eine immer größere Rolle. Nach Mishra und Koehler (2006) gehört dazu nicht nur das Wissen für einen erfolgreichen Umgang mit Hard- und Software, sondern auch das Wissen rund um einen sinnvollen Einsatz von Hard- und Software im Unterricht. Hinzu kommt das Wissen über digitale Medien, die speziell für das jeweilige Fach geeignet sind. Das Wissen über effektive Einsatzszenarien, die ein Lernen von Fachinhalten mit digitalen Medien ermöglichen, verbindet und erweitert alle zuvor genannten Wissensarten (Technological Pedagogical Content Knowledge, TPACK).

Anzeichen darüber, welche Einsatzszenarien digitaler Medien im Unterricht besonders lernwirksam sind und welche nicht, finden sich nach Zierer (2018) in den von Hattie, Beywl und Zierer (2013) analysierten Faktoren zur Digitalisierung. Hohe Effektstärken werden von den Forschenden erst dann erwartet, wenn durch den Einsatz digitaler Medien eine tiefgreifende Transformation der Lernaktivitäten stattgefunden hat. Das ist genau dann nicht der Fall, wenn im Zuge der Digitalisierung digitale Medien als Ersatz für analoge Medien (mit oder ohne funktionale Verbesserung) herangezogen werden. Solche Einsatzszenarien werden im SAMR-Modell von Puentedura (2006) zur Analyse der technischen Integration im Unterricht in den untersten zwei Ebenen beschreiben („Substitution“, Ersatz und „Augmentation“, Erweiterung). Auf den oberen Ebenen wird von einer Neugestaltung oder gar der Erzeugung völlig neuartiger Lernaktivitäten gesprochen („Modification“, Änderung und „Redefinition“, Transformation). Die Auswertung von 85 Unterrichtsvideos des Biologieunterrichts im gymnasialen Zweig durch Kramer et al. (2019) hat gezeigt, dass in knapp 71 % der Fälle digitale Medien als Ersatz eines herkömmlichen Mediums eingesetzt wurden.

Für den Physikunterricht können folgenden Einsatzszenarien digitaler Medien hervorgehoben werden:

- Grafikorientierte Modellbildung: Visualisierung eines Systems durch ein Begriffsnetz mit anschließender Vorhersage (vgl. Schecker, 1998)
- Mathematische Modellbildung: Numerische Berechnung einer Bewegung durch Vorgabe der Kräfte (vgl. Weber & Wilhelm, 2020)
- Simulationen: Schematische Darstellung realer Experimente mit Eingabe von Werten und Ausgabe simulierter Ergebnisse (vgl. de Jong, 2006)
- Interaktive Bildschirmexperimente: Fotografische Darstellung und Steuerung realer Experimente (vgl. Kirstein, Haase, Mühlenbruch & Nordmeier, 2016)

- Interaktive Experimentiervideos: Videoaufnahmen realer Experimente mit Steuerungsmöglichkeit, Hintergrundinformationen und Aufgaben (vgl. Glatz, Erb & Teichrew, 2021)
- Videoanalyse: Aufnahme von realen Bewegungen mit anschließender Analyse (vgl. Suleder, 2020)
- Digitale Messwerterfassung: Erfassung von Messwerten mit digitalen Sensoren mit anschließender Visualisierung (vgl. Lampe, Liebner, Urban-Woldron & Tewes, 2015)

Aus einer mediendidaktischen Perspektive liegen die Vorzüge der Darstellung von physikbezogenen Inhalten auf einem Bildschirm in der Möglichkeit zur (a) Wiederholung von Prozessen mit Anpassung der Geschwindigkeit an den Betrachter, (b) Berechnung und Einblendung von Zusatzinformationen zur Visualisierung von abstrakten Konzepten sowie (c) Exploration von komplexen Systemen, die für diesen Zweck digitalisiert worden sind. Digitale Medien können somit durch eine adäquate Präsentation von Konzepten und Inhalten den Auf- und Ausbau mentaler Modelle durch ihr Informationsangebot unterstützen, indem sie externe Repräsentationen vorstellen und durch Visualisierung wichtige Hinweise liefern (Girwidz, 2020a, S. 490). Ainsworth (2006) bezeichnet die Konstruktion mentaler Modelle auch als *Abstraktion*, durch die Lernende Konzepte auf einer höheren Organisationsebene erfahren. Sie sorgen in der Taxonomie der Funktionen von multiplen Repräsentationen neben der Erweiterung und Darstellung von Zusammenhängen für ein tieferes Verständnis (S. 187ff). Über verschiedene Medien hinweg kann die zugrunde liegende Struktur der dargestellten Phänomene offengelegt werden. Jedoch weist Tergan (1997) in seiner Analyse der empirischen Ergebnisse zum Lernen mit multiplen Repräsentationen darauf hin, dass die Bereitstellung von zusätzlichen Perspektiven auf den Lerninhalt nicht automatisch zu höheren Leistungen in der Aneignung von Wissen führt. Die Lernleistung könnte vor allem bei Anfängern aufgrund der zusätzlichen kognitiven Belastung abnehmen, da neue Darstellungsformen und ihre wechselseitigen Beziehungen zunächst kognitiv durchdrungen werden müssen (S. 15). Winn et al. (2006) haben zudem den Einfluss der Authentizität der Darstellungen untersucht und fanden heraus, dass im Vergleich zu Simulationen insbesondere Anfänger vom Lernen in einer authentischen Umgebung profitieren. Sie kommen zu dem Schluss, dass beide Lerngelegenheiten nicht miteinander konkurrieren sollten,

2 Modelle

da sie sich gegenseitig ergänzen. Modellbasierte Erfahrungen mit wissenschaftlichen Visualisierungen könnten der Vorbereitung der Arbeit mit realen Objekten dienen (S. 39f).

Weiterhin haben Studien gezeigt, dass die Möglichkeiten digitaler Medien aus einer Reihe von Gründen nicht breitflächig im Unterricht ausgenutzt wurden und werden (vgl. Pietzner, 2009; Schmid, Goertz, Behrens & Bertelsmann Stiftung, 2017; Wenzel & Wilhelm, 2015). Das liegt zum einen an der Bekanntheit der Unterrichtskonzepte und der verwendeten Software. Die Verbreitung der Ideen geschieht in der Regel auf freiwilliger Basis über die Teilnahme an Fortbildungen und den Bezug von entsprechenden Unterrichtszeitschriften. Zum anderen ist Zeit und Motivation zum Selbststudium nötig, da der Einsatz digitaler Medien gerade zu Beginn mit einem technischen und organisatorischen Mehraufwand verbunden ist. Nicht zuletzt machen fehlende Lizenzen oder veraltete Soft- und Hardware, die allen Lernenden nur in PC-Räumen oder mithilfe von vereinzelt Laptopwägen zur Verfügung gestellt werden kann, das eigenständige Lernen am Computer zu einer Ausnahme vom Regelunterricht.

Die allgegenwärtige Nutzung von Smartphones und Tablets im Alltag und Beruf eröffnet für den Einsatz digitaler Medien im Unterricht neue Perspektiven. Die Beschaffung ist kostengünstig und unter Umständen bietet sich auch die Nutzung privater Geräte an (Bring Your Own Device, BYOD; Dehmel, 2013). Die Bauweise macht eine flexible Verwendung direkt im Klassen- oder Fachraum möglich. Zudem ist die Bedienung verschiedener Apps durch einheitliche Designelemente und Steuerungsgesten intuitiv geworden (z. B. Drag and Drop oder Pinch-to-Zoom). Bei bestehender Internetverbindung ist das Herunterladen von speziellen Apps für den Physikunterricht oder Streamen, Teilen und Kommentieren von Unterrichtsmaterialien genauso möglich, wie es in der Unterhaltungsbranche üblich ist. Nicht zuletzt besteht im inklusiven Unterricht die Möglichkeit mit Barrieren umzugehen. Darüber hinaus eignen sich viele eingebaute Funktionen für einen Einsatz im Rahmen des Physikunterrichts. Während des Experimentierens können Smartphones und Tablets als Anzeige- und Schreibgeräte verwendet werden, um Anleitungen zu befolgen und Beobachtungen, Messwerte oder Probleme aufzuschreiben. Mithilfe von Foto- oder Videoaufnahmen können Tafelbilder übernommen oder Experimente fotografiert bzw. gefilmt werden. Zudem ergeben sich durch die eingebauten Sensoren Möglichkeiten zur digitalen Messwerterfassung im Physikunterricht. Mit speziellen Apps wie *phyphox* (vgl. Staacks, Hütz, Heinke & Stampfer, 2018) oder *Science Journal* (vgl. Teichrew,

Wilhelm & Kuhn, 2021) können verschiedene Größen nicht nur gemessen, sondern auch dargestellt, ausgewertet und gespeichert werden.

Mit digitalen Messwerterfassungssystemen, interaktiven Bildschirmexperimenten (IBE), interaktiven Experimentiervideos und Videoanalysesoftware lassen sich reale Experimente beobachten, durchführen und auswerten. Ihr Einsatz bietet sich damit vor allem für den Ausbau von Experimentierkompetenzen an, während animierte Simulationen und verschiedene digitale Werkzeuge zum Modellieren bei entsprechender Einbettung in den Unterricht Modellkompetenzen fördern können. Greefrath und Weitendorf (2013) führen Einsatzmöglichkeiten für Modellierungssoftware auf, u. a. das Visualisieren mathematischer Modelle, das Simulieren von Realsituationen und das virtuelle Experimentieren. Im Folgenden werden zunächst gleichungsbasierte Anwendungen für diese Zwecke vorgestellt (siehe Kapitel 2.4.1). Im Anschluss daran wird das didaktische Potenzial einer DGS zur Modellierung physikalischer Systeme diskutiert (siehe Kapitel 2.4.2).

2.4.1 Mathematische und grafikorientierte Modellbildung

Die Bedeutung des Begriffs Modellbildung muss ähnlich wie die des Begriffs Modell je nach Kontext erläutert und eingeordnet werden, da seine Verwendung nicht einheitlich ist. Mittelstraß (2005) zählt als „Funktionen der Modellbildung“ verschiedene Zwecke auf, die Modelle erfüllen können (S. 66):

1. Vereinfachung komplexer Strukturen
2. Veranschaulichung abstrakter Strukturen
3. Instrument zur Konstruktion von Theorien
4. Instrument zur Anwendung und Prüfung von Theorien
5. Instrument zur Vermittlung zwischen Theorie und Realität
6. Instrument zur Aufbereitung von Daten
7. Instrument zum besseren Verständnis abstrakter Theorien und Formalismen
8. Instrument zu didaktischen Zwecken

Das suggeriert ein enges Verständnis der Modellbildung als Konstruktion eines Modells für einen bestimmten Zweck. Für diesen Prozess, dessen Ziel ein Modell ist, bietet sich allerdings eher der Begriff *Modellierung* an, wie er auch im Zusammenhang mit allgemeinen Modellierungskreisläufen verwendet wird, die den Konstruktionsprozess beschreiben und ihn in Teilprozesse unterteilen (siehe Kapitel 2.3.2). Im Kontext des Physikunterrichts hingegen wird der Begriff *Modellbil-*

2 Modelle

„*ding* von Schecker (1998) weiter gefasst. Er kennzeichnet die „Konstruktion eines Netzwerks physikalischer Begriffe und Beziehungen, mit denen das Verhalten eines physikalischen Systems beschrieben und vorhergesagt werden kann“ (S. 23). Modellbildung beschränkt sich in diesem Fall nicht nur auf die Konstruktion, sondern weitet sich auch auf die Anwendung des Modells zur Vorhersage bezüglich eines Systems aus.

Schecker (1998) stellt im Vergleich zu fertigen Simulationsprogrammen die höheren Anforderungen von Modellbildungssystemen heraus, wenn das eigenständige Modellieren eines Phänomens durch Lernende im Vordergrund steht. Beim Einsatz einer fertigen Simulation könne demnach die „physikalische Denkarbeit“ entfallen, da die Struktur des Phänomens nicht mehr beschrieben werden muss (S. 24). Wie Girwidz (2013) allerdings betont, kann ein Lernen mit Animationen oder auch Simulationen erfolgreich sein, wenn mit entsprechenden Methoden „die dargebotenen Informationen aktiv von den Lernenden verarbeitet werden“ (S. 9). Die Informationsverarbeitung kann demzufolge mit Arbeitsaufträgen angeleitet und unterstützt werden wie (a) Darstellungen in eigene Worte fassen, (b) Zusammenhänge beschreiben, (c) Vorhersagen ableiten, (d) mit statischen Abbildungen und Texten vergleichen oder (e) Merksätze bzw. Fragen formulieren. Der Einsatz einer Software sollte sowohl beim eigenständigen Modellieren als auch bei einer fertigen Simulation hauptsächlich die notwendige Rechen- oder Zeichenarbeit reduzieren, um zu einem mathematischen Ergebnis und seiner Visualisierung zu kommen. Solange das der Simulation zugrundeliegende Modell transparent bleibt und von den Lernenden mithilfe von passenden Arbeitsaufträgen eigenständig nachvollzogen werden kann, wird nur die Mathematik und nicht die Physik „vereinfacht“.

Das eigenständige Modellieren von Phänomenen ist deshalb nur eine von vielen Möglichkeiten, Modellbildungssysteme im Unterricht einzusetzen. Van Joolingen (2004) erläutert die spezifischen Anforderungen an Modellierungswerkzeuge im forschend-entdeckenden Unterricht. Er unterscheidet zunächst drei Lernaktivitäten:

1. Exploratives Modellieren (*exploratory modelling*): Die Lernenden entdecken die Eigenschaften von Modellen, indem sie Parameter ändern und die Auswirkungen dieser Änderungen beobachten (Black-Box Simulation), oder sie untersuchen zusätzlich auch die Strukturen der Modelle (Glass-Box Simulation).

2. Forschendes Modellieren (*inquiry modelling*): Die Lernenden konstruieren bzw. rekonstruieren Modelle, die die experimentellen Ergebnisse erklären und Vorhersagen bezüglich neuer Phänomene machen können.
3. Expressives Modellieren (*expressive modelling*): Die Lernenden erstellen Modelle, um ihre eigenen Vorstellungen und Konzepte zu bestimmten Themen auszudrücken.

Oh und Oh (2011) fügen zwei weitere Ansätze zur Arbeit mit Modellen im Unterricht hinzu:

4. Evaluatives Modellieren (*evaluative modelling*): Die Lernenden vergleichen alternative Modelle, die sich mit demselben Phänomen oder Problem befassen. Sie bewerten ihre Vorzüge sowie Grenzen und wählen das am besten geeignete Modell aus, um das Phänomen zu erklären oder das Problem zu lösen.
5. Zyklisches Modellieren (*cyclic modelling*): Die Lernenden sind an einem sich wiederholenden Prozess zur Entwicklung, Bewertung und Verbesserung von Modellen beteiligt, um längere wissenschaftliche Projekte zu verfolgen.

Diese fünf Arten der Modellierungsaktivitäten spiegeln auch wider, wie Modelle in der Wissenschaft verwendet werden (siehe Kapitel 2.2) und sollten daher im naturwissenschaftlichen Unterricht gleichermaßen vorkommen. Unabhängig davon, ob ein neues Modell konstruiert oder ein vorhandenes untersucht wird, tragen mit klassischen oder digitalen Werkzeugen erstellte externe Repräsentationen von Modellen (Visualisierungen) dazu bei, die kognitiven Aktivitäten zu organisieren, indem sie die Aufmerksamkeit auf bestimmte Aspekte eines Modells lenken. Sie ermöglichen das Abrufen und Speichern von Informationen sowie wichtiger struktureller und kausaler Zusammenhänge (Nersessian, 1999, zitiert nach Oh & Oh, 2011, S. 1120).

Modelle, die auf numerischen Methoden basieren, spielen immer dann eine große Rolle, wenn es nicht möglich ist, Gleichungen eines mathematischen Modells analytisch zu lösen. Computer haben dadurch einen großen Einfluss auf die moderne Wissenschaft, die mit ihnen komplexe Probleme lösen kann (Frigg & Hartmann, 2020). Auch für die Physikdidaktik sind numerische Methoden interessant, da aus grundlegenden physikalischen Gesetzen Modelle konstruiert werden können, die keine hohen mathematischen Anforderungen besitzen, aber durch iterative Berechnungen komplexe Lösungen liefern. Dadurch wird es möglich, im Physikunterricht authentische Probleme zu behandeln, die ansonsten nur

2 Modelle

mit größerem mathematischem Aufwand lösbar wären und deshalb vermieden werden. Infolgedessen liegt der Fokus auf bestimmten Gleichungen, die geschlossene Lösungen einfacher physikalischer Systeme darstellen wie z. B. das Zeit-Weg-Gesetz der gleichmäßig beschleunigten Bewegung.

Wilhelm (2018) skizziert die Geschichte numerischer Methoden im Physikunterricht angefangen vom Euler-Verfahren zur einfachen numerischen Lösung eines Anfangswertproblems, das als Methode der kleinen Schritte bekannt ist. Das Standardbeispiel ist die näherungsweise Berechnung der Geschwindigkeit eines Körpers anhand seiner Beschleunigung, die wiederum auf die resultierende Gesamtkraft zurückgeführt wird. In einem Tabellenkalkulationsprogramm wie *Excel* entspricht dann jede Zeile einem Zeitpunkt, zu dem die verschiedenen Größen aus der vorhergehenden Zeile berechnet werden. Die Genauigkeit des Verfahrens hängt vor allem bei komplexeren Modellen stark von dem gewählten Zeitabstand Δt ab.

Girwidz (1998) betrachtet im Programm *Medium2D* eine diskrete Massenverteilung in einer Gitterstruktur, um mit der „finiten Differenzmethode“ den zeitlichen Ablauf von Wellenphänomenen zu visualisieren (S. 278).¹⁰ Lück (2018) stellt mit *Fluxion* ein Programm vor, mit dem Systeme gewöhnlicher Differentialgleichungen numerisch mit dem robusten Runge-Kutta-Verfahren der vierten Ordnung mit Schrittweitensteuerung berechnet werden. *Newton-II* ist dagegen speziell für die Berechnung von mechanischen Bewegungen durch die Angabe der Kräfte ausgelegt (Lück, 2008).¹¹ Die Ausgabe der Ergebnisse erfolgt sowohl in einer Tabelle als auch in einem anpassbaren Koordinatensystem. Ein mögliches Einsatzszenario solcher Programme beginnt mit der Durchführung eines Experiments. Daraufhin werden Ideen gesammelt, welche Kräfte während der Bewegung auf das sich bewegende Objekt gewirkt haben könnten, die als Grundlage der Modellierung dienen. Nach einem ersten Test des Modells findet der Vergleich des Modells mit den Messergebnissen statt, die in das Programm eingefügt werden (Weber & Wilhelm, 2021, S. 47).

Im Allgemeinen wird heute unabhängig vom Lösungsverfahren oder dem verwendeten Programm von der *mathematischen Modellbildung* gesprochen, wenn zunächst die Zusammenhänge zwischen den relevanten physikalischen Größen

¹⁰ Die aktuelle Fassung ist bei Girwidz (2020b) beschrieben und kann auf der Webseite des Lehrstuhls für Didaktik der Physik der LMU München aufgerufen werden (Girwidz, n. d.).

¹¹ Beide Programme können auf der *Did-Apps* Webseite des Lehrstuhls für Physik und ihre Didaktik der JMU Würzburg heruntergeladen werden (Lück, n. d.).

bestimmt werden und ein Computerprogramm daraus den Ablauf numerisch berechnet. Didaktisch wird dieser Zugang dadurch begründet, dass zum Verständnis eines Phänomens nicht so sehr das numerisch berechnete oder analytisch hergeleitete Ergebnis, sondern die im Modell verankerte physikalische Struktur des Vorgangs verantwortlich ist (Schecker, 1998, S. 23).

Viele Systeme können mit Flussdiagrammen beschrieben werden (System Dynamics nach Forrester, 2007), was in den 1980ern zur Entwicklung von Programmen zur grafikorientierten Modellierung dynamischer Systeme wie *STELLA* und später *Dynasys* geführt hat, das schulischen Anforderungen gerecht werden sollte.¹² In der *grafikorientierten Modellbildung* wird das Modell als Netz definiert und visualisiert, dessen Knoten aus physikalischen Größen bestehen, die durch Pfeile verknüpft sind. Dadurch soll ein qualitativ-begrifflicher Zugang unterstützt werden, der das Phänomen physikalisch grundlegend beschreibt und die zentralen Annahmen hervorhebt, ohne von mathematischen Problemen überdeckt zu sein. Auch hier ist ein Vergleich der Modellvorhersage mit Daten aus Experimenten oder der Literatur vorgesehen, sodass die Angemessenheit der im Modell formulierten physikalischen Annahmen überprüft wird (Schecker, 1998, S. 10). Dennoch steht hinter dem visuellen Netz eine Reihe von Gleichungen, die numerisch gelöst werden.

Wilhelm (2018) zählt neben den bereits angesprochenen Programmen zur grafikorientierten Modellbildung *Powersim*, *Modus*, *Coach*, *VisEdit* und *Moebius* auf. Wie Wenzel und Wilhelm (2015) in einer Befragung zeigen konnten, bleibt jedoch Tabellenkalkulation die von den Physiklehrkräften am meisten eingesetzte Software. Zudem gibt es deutliche regionale Effekte, die entweder mit der gezielten Verbreitung bestimmter Software im Umkreis des Standorts der Entwickelnden zusammenhängen oder mit dem Einsatz eines Schulbuchs eines bestimmten Verlags, der Software und ausgearbeitete Beispiele zur Verfügung stellt. In der Regel handelt es sich bei den aufgezählten Anwendungen um Installationsprogramme, die von den Entwickelnden nicht mehr an aktuelle Standards, was Gestaltung, Bedienung und Bildschirmauflösung angeht, angepasst werden. Mit *SageModeler* steht hingegen ein aktuelles und webbasiertes Tool zur grafikorientierten Modellierung dynamischer Systeme zur Verfügung (siehe Abbildung 10).¹³

¹² Die Software wird auf der *Hupfeld-Software* Webseite beschrieben und kann im Download-Bereich heruntergeladen werden, ist aber „unter aktuellen Windows-Versionen nur bedingt lauffähig“ (Hupfeld, 2022).

¹³ Das Programm kann auf der *Sagemodeler* Webseite aufgerufen werden (Concord Consortium, 2020).

2 Modelle



Abbildung 10: Grafik-Ansicht eines Modells zum radioaktiven Zerfall nach Schecker (1998, S. 9f) in SageModeler

Wilhelm (2018) kommt nach der Darstellung von verschiedenen Studien zu dem Schluss, dass die Modellierung von Bewegungen mit Modellbildungssystemen im Unterricht das Verständnis der Newtonschen Mechanik fördern kann (S. 9). Allerdings wurden die hohen Erwartungen bezüglich weitreichender Kompetenzen – wie die des systemischen Denkens – in anderen Kontexten nicht erfüllt (Schecker, Klieme, Niedderer, Ebach & Gerdes, 1999). Im Allgemeinen lässt sich außerdem sagen, dass die Berechnung allein keine bessere Lernerfahrung für die Lernenden garantiert (Weber & Wilhelm, 2020, S. 15).

2.4.2 Dynamische Geometrie-Software

Der Begriff *dynamische Geometrie* lässt sich als ein Gegenstück zur starren *euklidischen Geometrie* auffassen, wo Beweise vor allem mit den Mitteln der Arithmetik und Algebra geführt werden. Geometrische Konstruktionen nehmen hierbei die Rolle der „Visualisierung des schriftlichen Protokolls“ ein (Bender, 1989, S. 109). Im Wesentlichen unterstützen sie das Erkennen der Bezeichnungen der einzelnen Variablen und ihrer Beziehungen. Obwohl in der Argumentationskette der Beweise Variablen verwendet werden, sehen Mathematikdidaktiker das Problem der fehlenden Erkenntnis der Allgemeingültigkeit der auf diese Weise gewonnenen Aussagen: In den Augen der Lernenden läuft der Beweisprozess beispielgebunden ab. Als Lösung schlägt Bender (1989) die Betrachtung von „stetigen Übergängen“ in Bewegungen bzw. Verformungen der Figuren (Konfigurationen) vor:

Auch wenn nur eine oder mehrere Figuren explizit betrachtet werden, so werden dabei doch (überabzählbar) unendlich viele durchlaufen, und man hat es, besonders wenn man alle wesentlich verschiedenen Fälle durchlaufen hat, nicht mehr weit bis zur Allgemeingültigkeit. (S. 110)

Solche Bewegungen in Form von aufwendig hergestellten Gegenständen bzw. Filmen in den Mathematikunterricht einzubinden, hat sich jedoch als nicht besonders praktikabel bzw. aktivierend erwiesen. Das hat sich seit der Verfügbarkeit von Computern und der Entwicklung von Software, die eine echte dynamische Geometrie erlaubt, grundlegend geändert. Mit Computerunterstützung wird der geometrische Erfahrungshorizont erweitert, indem durch das Bewegen einer Zeichnung Allgemeingültigkeiten zu erkennen sind (Jürgen & Kortenkamp, 2002, S. 369).

Eine DGS zeichnet sich dadurch aus, dass der Computer nicht nur als Konstruktionswerkzeug benutzt wird, sondern die fertige Konfiguration dynamisch variiert werden kann. Das geschieht entweder mithilfe von Schiebereglern, sodass eine „einzelne Variable der Konfiguration stetig bzw. quasistetig“ verändert werden kann, oder infolge des Zugmodus, bei dem Punkte auf der Grafikoberfläche mit der Maus gezogen werden können (Roth, 2008, S. 131). Wenn freie Objekte verschoben werden, verändern sämtliche abhängigen Objekte ihre Lage, sodass sich Abhängigkeiten erfassen lassen, die in einer statischen Konstruktion nicht sichtbar wären.

Roth (2008) formuliert das übergeordnete Ziel des Einsatzes einer DGS im Mathematikunterricht, bei den Lernenden das *bewegliche Denken* zu fördern. Sie sollten daraufhin auch ohne DGS (a) Bewegungen und Veränderungen in statische Phänomene hineinsehen, (b) diese analysieren und (c) das Änderungsverhalten beschreiben können. Bei komplexeren Gegebenheiten sollten sowohl Lehrende als auch Lernende in der Lage sein, die DGS zur Kontrolle, als Werkzeug oder Kommunikationsmittel eigenständig zu nutzen. Es werden als Inhaltsdimension fünf Einsatzszenarien einer DGS im Unterricht spezifiziert (S. 132ff):

1. Einzelne Elemente des beweglichen Denkens kommunizieren
2. Komplette Beweisidee vermitteln
3. Ein Verständnisgrundlage für Begriffe und ihre Eigenschaften schaffen
4. Experimentelles Arbeiten zum Entdecken von Zusammenhängen bzw. im Problemlöseprozess ermöglichen
5. Den Problemlöseprozess reflektieren

2 Modelle

In einer Unterstützungsdimension unterscheidet er drei Stufen der Gestaltung des DGS-Einsatzes:

1. Eine dynamische Konfiguration ist vollständig (evtl. mit Möglichkeit zum Ein- und Ausblenden von Elementen) vorgegeben.
2. Eine dynamische (Teil-)Konfiguration ist zum Ergänzen und Verändern vorgegeben.
3. Es wird mit einer leeren, unstrukturierten Zeichenoberfläche gearbeitet.

Die inhaltlichen Ziele, die mit einer DGS in einer mehr oder weniger offenen Lernumgebung erreicht werden können, lassen sich auch auf den Physikunterricht übertragen.¹⁴ Es wird nur nicht vom *Beweisen*, sondern vom *Herleiten* der Zusammenhänge gesprochen (siehe Punkt 2). Werden die möglichen Ziele einer DGS im SAMR-Modell von Puentedura (2006) betrachtet, lässt sich feststellen, dass die Demonstration einer dynamischen Konfiguration (siehe Punkte 1 bis 3) einen Ersatz für das analoge Medium Tafel oder Schulbuch darstellt, obwohl die Dynamik eine nicht zu vernachlässigende funktionale Verbesserung ist. Die eigenständige Bearbeitung oder Erstellung einer dynamischen Konfiguration durch Lernende (siehe Punkte 4 und 5), ist bereits eine Neugestaltung der üblichen Phase des Erkennens von Zusammenhängen bzw. des Problemlösens. Für das im Anschluss real durchgeführte Experiment gibt es ebenso verschiedene Möglichkeiten der Transformation der Lernaktivitäten mithilfe digitaler Medien (vgl. Laumann, Wichtrup & Friege, 2019). Die DGS *GeoGebra* erlaubt mit der integrierten AR-Funktion hierbei eine besondere Art der Digitalisierung von Experimenten (siehe Kapitel 3.1.5).

Wird beim Lernen von mathematischen Inhalten die Wirksamkeit von dynamischen Visualisierungen mit statischen Repräsentationen verglichen, lassen sich bereits durch die passive Beobachtung einer dynamischen Konstruktion Effekte erzielen. Die eigenständige Interaktion mit der Visualisierung im Vergleich zur Animation erbrachte in dieser Studie allerdings keine signifikante Steigerung der Testergebnisse (Rolfes, Roth & Schnotz, 2020, S. 12f). Die Annahmen zur Lernwirksamkeit von Animationen leiten sich aus der Supplantationstheorie von Salmon (1976, zitiert nach Martschinke, 2001, S. 16) ab, die besagt, dass innere kognitive Prozesse durch äußere Visualisierungen dieser Prozesse ersetzt werden können (mentale Modelle und Modellobjekte, siehe Kapitel 2.1). Richtberg

¹⁴ Allgemeine Dimensionen und Grade der Öffnung von Unterricht bzw. einzelnen Unterrichtssequenzen sind bei F. Peschel (2002) und eine Übertragung auf das Experimentieren bei M. Peschel (2009) zu finden.

und Girwidz (2013) unterstreichen die Vorzüge dynamischer Visualisierungen insbesondere bei Prozessen mit einer klaren zeitlichen Sequenzierung sowie bei veränderlichen physikalischen Systemen (S. 14). Dafür eignen sich vor allem Objekte, die „über die natürliche Wahrnehmung hinausgehen und physikalische Größen zeigen, die normalerweise nicht sichtbar sind“ (Girwidz, 2013, S. 9).

Vorgefertigte dynamische Konfigurationen eignen sich demnach auch zur Vermittlung von physikalischen Ideen und Begriffen durch eine Demonstration oder als Möglichkeit für die Lernenden, eigenständige Entdeckungen von Zusammenhängen zu machen. Auf einer nächsten Stufe können Phänomene durch eigene Modellierungsprozesse mit teilweise vorstrukturierten Modellen untersucht werden. Erst bei genügend Erfahrung im Umgang mit einer DGS sollten Lernende mit offenen Modellierungsaufgaben konfrontiert werden. Geometrische Konstruktionen bilden dabei nicht nur den Kern der geometrischen Optik, sondern spielen auch in anderen Bereichen der Physik als Werkzeuge der Visualisierung naturwissenschaftlicher Ideen und Konzepte eine Rolle (vgl. Erb, Wilhelm & Kuhn, 2015; Teichrew, Erb, Wilhelm & Kuhn, 2019; Teichrew & Grasse, 2021; Weber & Teichrew, 2021).

Frei zugängliche DGS

Es gibt einige frei zugängliche und für den Bildungs- bzw. Forschungsbereich kostenlos verfügbare Programme und Apps, die als DGS bezeichnet werden können.¹⁵ Sie sind überwiegend auf den Mathematikunterricht ausgerichtet. Es gibt jedoch DGS, die für die Gestaltung von dynamischen Modellen für den bzw. im Physikunterricht verwendet werden können. Es handelt sich dabei um Softwarepakete, die umfangreichere Modellierungs- und Gestaltungsmöglichkeiten bieten als für einfache (dynamische) Konstruktionen mit Zirkel und Lineal notwendig sind. Für diesen Zweck gibt es DGS, die auch als Geometrie-Apps bezeichnet werden können (eingeschränkter Funktionsumfang).¹⁶ Ein wichtiges Unterscheidungsmerkmal in diesem Zusammenhang ist die Möglichkeit, Objekte sowohl als

¹⁵ Dazu gehört auch die *TI-Nspire™ CX Software*, die es erlaubt, dieselben Funktionen auszuführen wie an einem entsprechenden Grafikrechner von *Texas Instruments*, der darüber hinaus auch dynamische Geometrie beherrscht und die Erstellung interaktiver Dokumente erlaubt. Da jedoch ein freier Zugang zu digitalen Medien sowohl für Entwickelnde als auch für Nutzende wünschenswert ist, wird auf käuflich erwerbbar Produkte nicht näher eingegangen (eingeschränkte Verfügbarkeit).

¹⁶ Die unterschiedlichen angesprochenen Einschränkungen in diesem Kapitel beziehen sich auf einen technisch einfachen, didaktisch sinnvollen und von äußeren Bedingungen (z. B. Verfügbarkeit von bestimmten Lizenzen, Geräten oder Betriebssystemen) weitestgehend unabhängigen Einsatz der DGS durch Lehrende und Lernende speziell im Physikunterricht.

2 Modelle

algebraische Ausdrücke als auch grafisch zu erzeugen oder zu verändern. Außerdem lassen sich unabhängig vom Funktionsumfang DGS finden, die als Browser-Apps online verfügbar sind und nicht installiert werden müssen. Die auf diese Weise erstellten Materialien lassen sich für gewöhnlich leicht an Lernende verteilen. Bei Installationsprogrammen lässt sich hingegen dasselbe Problem beobachten wie bei anderer Modellbildungssoftware (siehe Kapitel 2.4.1). Die Entwickelnden können ihre Anwendung häufig nicht für alle Betriebssysteme anbieten und die Weiterentwicklung bzw. notwendige Anpassung an aktuelle Soft- und Hardwarestandards erfolgt entweder verspätet oder wird nach einiger Zeit gänzlich eingestellt. Auch auf der Programmiersprache *Java* basierte Applets, die normalerweise in einem Browser ausgeführt wurden, werden aus Sicherheitsgründen nicht mehr unterstützt, wenn sie nicht in HTML5 umgewandelt wurden (eingeschränkte Geräteunabhängigkeit und Aktualität). Einige DGS sind zudem als Apps für Mobilgeräte erschienen, die als native Anwendungen eine höhere Leistungsfähigkeit aufweisen als entsprechende Browser-Apps auf diesen Geräten.

In der freien Internet-Enzyklopädie *Wikipedia* lässt sich eine detaillierte Übersicht der bekannten DGS und verschiedene Funktionen in tabellarischer Form finden („List of interactive geometry software“, 2021). In dem folgenden Überblick erfolgt eine Aufzählung frei zugänglicher und persönlich geprüfter Programme in alphabetischer Reihenfolge mit einer Kurzbeschreibung, die teilweise an den Wortlaut der Entwickelnden in den angegebenen Webauftritten angelehnt ist.¹⁷ Zudem werden einige Hinweise zum Funktionsumfang, Betriebssystem und zur Aktualität geliefert. Sofern verfügbar werden auch Links zur Browser-App oder zum entsprechenden App Store angegeben.

Archimedes Geo3D ist eine Software für dynamische Raumgeometrie von Andreas Goebel, die im Gegensatz zu den restlichen DGS vollständig dreidimensional (3D) ist. Sie wird schrittweise in eine Open-Source-Software umgewandelt (Meldung vom 17.10.2020). Die Version 2.0 alpha1 von 2016 ist nur als Windows und Linux Installation verfügbar.

- Webseite: <http://www.raumgeometrie.de>

Cabri Express ermöglicht als Installation für Windows oder macOS, im Browser oder auch als iPad-App, mathematische Berechnungen durchzuführen, den Graphen einer Funktion anzuzeigen oder eine Figur in 2D oder 3D zu konstruieren.

¹⁷ Der letzte Zugriff auf die in diesem Kapitel angegebenen Webseiten erfolgte am 31.10.2022.

In dieser Version der Software können zwar Funktionen über einen Taschenrechner eingegeben und in einem Koordinatensystem angezeigt werden. Die hinzugefügten Funktionen oder geometrische Konstruktionen können allerdings nur über den Zugmodus und nicht algebraisch verändert werden. Sie kann als frei verfügbare, weiterentwickelte Version der 1986 von Jean-Marie Laborde entworfenen *Cabri-géomètre* DGS gesehen werden. Das 2000 gegründete und in Frankreich ansässige Unternehmen *Cabrilog* vertreibt neben lizenzierten Versionen der Software (*Cabri II Plus* und *Cabri 3D*) auch eine Sammlung interaktiver Materialien (*1 2 3... Cabri*).

- Webseite: <https://cabri.com>
- Browser-App: <https://cabricloud.com/cabriexpress>
- App Store: <https://apps.apple.com/ch/app/cabri-express/id1492915630>

Cinderella erlaubt, geometrische Konstruktionen aller Art zu erstellen. Es lässt sich auch mit Massen, Federn, Ladungen und Feldern experimentieren. Damit wird die Erstellung vieler physikbezogener Visualisierungen und Simulationen von der DGS direkt unterstützt, was ein Alleinstellungsmerkmal dieser Software ist. *Cinderella* wurde seit 1998 vom Klett-Verlag herausgegeben und ist aktuell mit allen Features kostenlos für Windows, macOS und Linux verfügbar. Die Software wird von Ulrich Kortenkamp angeboten und weiterentwickelt. Es fehlt allerdings an einer vernetzten Gemeinschaft an Personen, die diese Software nutzen und ihre Materialien oder Anleitungen teilen könnten. Die Anwendung im Browser eines Mobilgeräts oder über eine App ist ebenfalls nicht möglich.

- Webseite: <https://www.cinderella.de>

Compass and Ruler (C.a.R.) ist ein Werkzeug von Rene Grothmann zum Lehren und Erleben von Geometrie. Es wurde mit Java programmiert und ist kostenlos sowie Open Source (auch bekannt als *Zirkel und Lineal*). 2015 bekam das Programm nach einer langen Pause ein vorerst letztes Update. Die Einbindung der Konstruktionen als Browser-Applets wird nicht mehr unterstützt.

- Webseite: <http://zul.rene-grothmann.de>

Desmos bietet einen großen Umfang an aktuellen Mathematik-Apps, Anleitungen und Online-Lernaktivitäten. Allerdings bietet keine Anwendung von *Desmos* die Verbindung von Algebra und Geometrie. Im *Grafikrechner* können keine Strecken oder Kreise per Werkzeug in das Koordinatensystem definiert werden und das *Geometrie-Tool* konzentriert sich auf die grundlegenden Werkzeuge Linie

2 Modelle

und Kreis. Es können keine Schieberegler oder Objekte mit algebraischen Ausdrücken hinzugefügt werden. Für die Modellierung physikalischer Phänomene können diese Einschränkungen eine Hürde sein.

- Webseite: <https://www.desmos.com>
- Geometrie-Tool: <https://www.desmos.com/geometry>
- Grafikrechner: <https://www.desmos.com/calculator>

DynaGeo ist ein Computerprogramm von Roland Mechling zur "beweglichen Geometrie", das die Erstellung von dynamischen Zeichnungen mit einer Vielzahl an Werkzeugen ermöglicht. Es ist für Windows als Open-Source und auf GitHub verfügbar. Die Version 4.0 aus dem Jahr 2016 kann mit einigen Beispielen für den Physikunterricht heruntergeladen werden. Obwohl das Programm ähnlich wie *Cinderella* vielseitig und zur Erstellung von dynamischen Materialien geeignet ist, entspricht die grafische Benutzeroberfläche und die Darstellung der Objekte nicht mehr aktuellen Erwartungen und Standards.

- Webseite: <http://www.dynageo.de>

FreeGeo ist ein dynamisches Mathematiksystem für Android, das interaktive Geometrie, Algebra, Statistik und Analysis für die Touch-Steuerung optimiert. Die App kann im Play Store kostenlos heruntergeladen werden und wurde von Lenart Kleinwort im Rahmen des Wettbewerbs *Jugend forscht* 2013 programmiert, der damit auch international Erfolg hatte. Seitdem u. a. *GeoGebra* native Apps für Mobilgeräte angeboten hat, verlor *FreeGeo* dieses Alleinstellungsmerkmal. Das letzte Update wurde im Jahr 2016 verzeichnet.

- Play Store: <https://play.google.com/store/apps/details?id=org.freegeof>

GeoGebra ist eine dynamische Mathematiksoftware für Lehrende und Lernende für alle Plattformen, die in viele Sprachen übersetzt wurde und im Bildungsbereich sowie in der Forschung kostenlos verwendet werden kann (für nicht kommerzielle Nutzung, vgl. „GeoGebra License“, 2021). Die Software wurde von Markus Hohenwarter entwickelt (Hohenwarter, 2006), der anschließend das *Internationale GeoGebra Institut* sowie die in Österreich ansässige *GeoGebra GmbH* gegründet hat. Das dahinterstehende Team kümmert sich u. a. um Weiterentwicklung, Anleitungen und Öffentlichkeitsarbeit in sozialen Netzwerken, wobei Lehrende in vielen Ländern Netzwerke gebildet und einen wesentlichen Teil zur Popularisierung der Software beigetragen haben. Über die auf der Webseite geschaffene Infrastruktur ist es möglich, sich aktiv an der Community zu beteiligen, indem Materialien erstellt und öffentlich auf der persönlichen Profildseite geteilt

werden. *GeoGebra* ist seit 2021 Teil des indischen Unternehmens BYJU'S, das Bildungssoftware und eine eigene Lernplattform für den Mathematikunterricht betreibt. Allerdings soll *GeoGebra* weiterhin als unabhängige Einheit innerhalb der BYJU'S-Gruppe unter der Leitung von Markus Hohenwarter operieren (*GeoGebra Team & Hohenwarter, 2021*). In der *Classic* Version werden Geometrie, Algebra, Tabellenkalkulation, Grafik, Statistik und Analysis verbunden. Alle konstruierten Objekte verfügen sowohl über eine algebraische Definition in der Algebra- oder Tabellen-Ansicht als auch über eine grafische Repräsentation in der Grafik-Ansicht. Es können nachträglich Änderungen einzelner Parameter in allen drei Ansichten vorgenommen werden, sei es das Austauschen einer Zahl durch einen vorher definierten Schieberegler, das Ziehen freier Punkte oder automatische Änderungen in einer von anderen Zellen abhängige Zelle der Tabelle. Die Ansichten und ihre Objekte werden stets synchronisiert und sind somit vollständig miteinander verknüpft. Diese Verzahnung von Algebra und Konstruktion mit geometrischen Werkzeugen kann in *GeoGebra* besonders einfach beobachtet und für die Modellierung (auch über die Eingabe von Befehlen) ausgenutzt werden. Ansonsten wirken sich die Änderungen, wie für eine DGS üblich, gleichzeitig auf alle abhängigen Objekte in allen Ansichten aus.

- Webseite: <https://www.geogebra.org>
- Browser-App: <https://www.geogebra.org/calculator>¹⁸
- Play Store:
<https://play.google.com/store/apps/dev?id=8237791256484396134>
- App Store: <https://apps.apple.com/de/developer/international-geogebra-institute-igi/id732854358>

In *sketchometry* können auf entsprechenden Geräten mit dem Finger oder mit der Maus Freihandskizzen gezeichnet werden. Die Skizzen werden automatisch in geometrische Konstruktionen umgewandelt, die anschließend bewegt werden können, was ein Alleinstellungsmerkmal ist. *sketchometry* ist kostenlos und kann sowohl in der Schule als auch privat frei verwendet werden. Das Programm ist ein Nachfolger von *GEONET* und *GEONExT*, die am Lehrstuhl für Mathematik und ihre Didaktik der Universität Bayreuth entwickelt wurden.

- Webseite: <https://sketchometry.org>

¹⁸ Es handelt sich um die App *Rechner Suite*, die eine Zusammenstellung der vier neueren Apps *Grafikrechner*, *3D Rechner*, *Geometrie*, *CAS* (Computeralgebrasystem) und *Wahrscheinlichkeit* darstellt. Eine Verzahnung der 2D-Ansicht des *Grafikrechners* und der 3D-Ansicht des *3D Rechners* ist in der aktuellen Version allerdings nicht erfolgt. Diesen Funktionsumfang gibt es weiterhin in der Browser-App *GeoGebra Classic* unter <https://www.geogebra.org/classic>.

2 Modelle

- Browser-App: <https://start.sketchometry.org>

Nach der groben Sichtung lässt sich eine Aussage über die Eignung der verfügbaren DGS zur Erstellung von dynamischen Modellen für den Physikunterricht treffen. Das Softwarepaket von GeoGebra bietet (a) einen umfangreichen Funktionsumfang, was die Möglichkeiten der Gestaltung und Programmierung komplexer dynamischer Modelle angeht, (b) freie Verfügbarkeit sowohl der Software als auch fertiger Anleitungen und Materialien für Lehrende und Lernende zu Bildungs- und Forschungszwecken, (c) größtmögliche Geräteunabhängigkeit durch Installation auf PC, Mac oder Mobilgeräten sowie diverse Browser-Apps und (d) Aussicht auf eine langfristige Aktualität, Weiterentwicklung und Anpassung der Software an gängige Standards. Im Folgenden wird der Einsatz von *GeoGebra* zum Lernen und Lehren im Mathematik- und vor allem im Physikunterricht detaillierter beschrieben.

Erstellung von Lernaktivitäten mit GeoGebra

GeoGebra hat viele Weiterentwicklungen erfahren, sodass sich die Benutzeroberfläche mehrfach geändert hat und neue Funktionen sowie Apps hinzugekommen sind. Andererseits existiert die Möglichkeit, mit dem ursprünglichen Installationsprogramm *GeoGebra Classic 5* für Windows und macOS zu arbeiten. Mit Version 6 wurde die Browser-App eingeführt, die fortan ohne Versionsnummer als *GeoGebra Classic* bezeichnet wird, da die Online-Version automatisch alle Fehlerbehebungen und Weiterentwicklungen erhält. Ein detaillierter Änderungsverlauf kann weiterhin im englischsprachigen *GeoGebra Handbuch* eingesehen werden („Reference:Changelog 6.0“, 2022).

Bereits unter Version 5 war es möglich, dynamische Konstruktionen nicht nur auf seinen eigenen Rechner zu speichern, sondern auch als Browser-Applet zu betrachten. Die Erstellenden haben dabei die Möglichkeit zu entscheiden, ob das Material „veröffentlicht“ wird. Damit kann es über die Suchfunktion auf der *GeoGebra* Webseite oder im öffentlichen Profil gefunden werden. Es kann jedoch auch nur über den erstellten Link (Einstellung „Geteilt“) bzw. nur über das persönliche Profil erreicht werden (Einstellung „Privat“). Das Pflegen des eigenen Profils als Sammlung für Online-Lernaktivitäten hat zunehmend an Bedeutung gewonnen, obwohl es weiterhin möglich ist, die Konstruktionen im speziellen GGB-Dateiformat offline zu sichern. Der Online-Zugang hat allerdings den wesentlichen Vorteil, dass die Materialien leicht mit anderen Lehrenden und Lernenden geteilt bzw. von ihnen gefunden werden können. Zudem können einzelne

dynamische Aktivitäten im Profil zu GeoGebra-Büchern zusammengefasst und in Ordnern sortiert werden.

Über die bereits angesprochene Suchfunktion auf der Webseite von *GeoGebra* können veröffentlichte Materialien zu verschiedenen Themen gefunden und in der beabsichtigten Weise bearbeitet werden. Da der Fokus der Entwicklung von *GeoGebra* stets auf dem Mathematikunterricht lag, lassen sich die Materialien nach mathematischen Themen sortieren (z. B. Algebra, Geometrie, Analysis usw.). Es lässt sich allerdings schnell feststellen, dass die Anzahl an öffentlichen Materialien, die speziell für den Physikunterricht entwickelt wurden, beachtlich ist.¹⁹ Mit dem Trend zur freien und niederschweligen Nutzung von Online-Materialien (Open Educational Resources, OER; Butcher & Moore, 2015) geht der Trend zur Erstellung solcher Materialien einher, und zwar nicht nur von Institutionen oder etablierten Medienkanälen, sondern auch von Privatleuten (User-Generated Content, UGC; Bauer, 2011). Lehrende und auch Lernende haben bei *GeoGebra* die Möglichkeit, Materialien nicht nur zu benutzen oder zu erstellen, sondern auch verfügbare weiterzuentwickeln. Mit der großen Anzahl und freien Verfügbarkeit geht unweigerlich eine Beliebigkeit der gestalterischen und inhaltlichen Qualität einher. Hier kommt es auf die Kompetenz der Lehrenden an, die angebotenen Materialien zu sichten, für den eigenen Unterricht bzw. die eigene Lerngruppe passend auszuwählen oder auch anzupassen. Sofern das Material die Einstellung „Öffentlich“ oder „Geteilt“ hat, kann sie kopiert, im eigenen Profil gespeichert und danach bearbeitet werden. Die fertige Seite enthält allerdings neben dem eigenen Namen zusätzlich einen Verweis auf das Profil der Erstautorin bzw. des Erstautors. Die Erstellung, Weitergabe und Überarbeitung eigener Medienprodukte mit *GeoGebra* entsprechen damit den aktuellen Trends im eLearning. Strenggenommen gehören die erstellten Materialeien jedoch nicht zu den Lehr- und Lernmaterialien, die als Public Domain öffentlich oder lizenzfrei und kostenlos verfügbar sind (OER). Der kommerzielle Gebrauch benötigt eine spezielle Lizenz. Für die Wissenschaft (wissenschaftliche Arbeiten und Konferenzen) und den Bildungsbereich (Lehrende und Lernende in Schulen und Universitäten) ist das Verwenden, Kopieren und Weitergeben von Material und Software frei („GeoGebra License“, 2021).

¹⁹ Um einen Eindruck darüber zu bekommen, können z. B. die Sammlungen von ...

- Roger Erb (Verfügbar unter: <https://www.geogebra.org/u/rephysik>),
- Claus Wolfseher (Verfügbar unter: <https://www.geogebra.org/u/lwolf>) oder
- Tom Walsh (Verfügbar unter: <https://www.geogebra.org/u/tomwalsh>) betrachtet werden.

2 Modelle

Die mit *GeoGebra* erstellten Konstruktionen lassen sich nicht nur im Browser eines Desktop-Computers oder Laptops, sondern auch in den für den mobilen Einsatz entwickelten Apps (*Geometrie*, *Grafikrechner*, *3D Rechner* und *CAS*) auf gängigen Smartphones oder Tablets öffnen und bearbeiten. Das macht einen regelmäßigen Einsatz auf den bei den Lernenden in der Regel vorhandenen Geräten im oder außerhalb des Unterrichts möglich (BYOD). Dennoch garantiert der breite Zugang zu Geräten und Medien keine effektiven Einsatzszenarien. Im Hamburger Projekt zum offenen BYOD-Ansatz hat der vermehrte Einsatz digitaler Medien im Unterricht nicht dazu geführt, dass eine bessere Informationskompetenz erworben wurde als in der Kontrollgruppe. Der Grund könnte darin liegen, dass – wie die Lernenden in der Projektgruppe angegeben haben – sich die „Wahrnehmungen des vergangenen Unterrichts“ seit Beginn des Projekts nicht verändert haben (Kammerl, Unger, Günther & Schwedler, 2016, S. 35). Eine Veränderung des üblichen Unterrichts wäre möglicherweise dann gegeben, wenn Lernende digitale Medien konsumieren, die klassische Medien nicht nur ersetzen (z. B. PDF statt Arbeitsblatt), sondern auch funktional verbessern (z. B. eine dynamische Darstellung statt der statischen betrachten). Im nächsten Schritt könnten Lernende digitale Medien eigenständig produzieren (Änderung bzw. Transformation des Unterrichts laut dem SAMR-Modell, siehe Kapitel 2.4).

Der Einsatz von *GeoGebra*-Apps im Unterricht erlaubt Lernaktivitäten anzustoßen, bei denen den Lernenden ein Werkzeug zur Verfügung gestellt wird, mit dem sie Objekte konstruieren, Ideen visualisieren und Modelle entwerfen können. Dadurch wird nach der Taxonomie von Schulmeister (2002) bereits ein hohes Interaktivitätsniveau erreicht. Bei einer Beschäftigung mit *GeoGebra*-Aktivitäten im Browser können zusätzlich solche Elemente ergänzt werden wie Text, PDF-Datei, Webseite, Video, Bild sowie offene Frage oder Mehrfachauswahl. Somit lassen sich mit *GeoGebra* als Werkzeug Lernumgebungen gestalten, die Instruktionen, multimediale Ergänzungen, mehr oder weniger vorgefertigte dynamische Modelle und formativen Testverfahren enthalten. Für eine erfolgreiche Vermittlung und Sicherung komplexer Sachverhalte muss allerdings darauf geachtet werden, dass – neben der Möglichkeit zur eigenständigen Visualisierung physikalischer Ideen – Räume für einen Diskurs der jeweiligen Lernprodukte geschaffen werden. Im Rahmen der Lernaktivitäten sind verschiedene Ergebnisse und Lernerfahrungen zu erwarten, die formuliert, dokumentiert und mit anderen geteilt werden können. Aus diesem Grund entwickelt sich *GeoGebra* immer mehr in Richtung eines eigenständigen Lernmanagementsystems (LMS). Einzelne oder in Büchern zusammengefasste Aktivitäten können mit

der Classroom-Funktion in Einheiten umgewandelt werden. Das Ziel ist, eine einfache Zusammenarbeit zwischen Lehrenden und Lernenden in interaktiven digitalen Kursen sowie in Präsenzveranstaltungen zu unterstützen (GeoGebra Team German, 2021). Lernende bearbeiten die geteilten Aktivitäten, während Lehrende eine Übersicht über den aktuellen Fortschritt einer bestimmten Aufgabe in Echtzeit sehen. Dafür müssen Lernende vor der Bearbeitung einen Namen eingeben, der jedoch von den Lehrenden anonymisiert werden kann, wenn Antworten der Klasse gezeigt werden sollen. Damit können die digitalen Lernprodukte (Antworten oder geometrische Konstruktionen) gemeinsam diskutiert werden.

3 Physikalische Modellbildung

Ungeachtet der fachdidaktischen Bemühungen zum Modellverständnis und der Modellmethode (siehe Kapitel 2.3) ist die Durchführung von Experimenten (practical work, vgl. Millar, 2010) nicht nur eine verbreitete Methode des naturwissenschaftlichen Unterrichts (Tesch & Duit, 2004), sondern auch oft die Grundlage der Erkenntnisgewinnung, die mit Schulbuchwissen ergänzt wird.

Unter einem *Experiment* kann sowohl eine Handlung zur Erzeugung eines zu beobachtenden Phänomens als auch zur Überprüfung einer Hypothese verstanden werden (Hacking, 1983, S. 149ff). Der erste Fall dient der Isolierung eines Phänomens aus der Vielfalt anderer Phänomene, um es besonders deutlich zu demonstrieren. Im Unterricht geschieht dies oft bei der Einführung in ein neues Thema. Allerdings sind Geräte und Materialien von Lehrmittelfirmen, mit denen typische Demonstrationsexperimente durchgeführt werden, bei korrekter Anwendung bereits so ausgelegt, ein möglichst störungsfreies Bild zu präsentieren, die nicht zur „Welt des Naturgegebenen“, sondern der „Theorie über die Natur“ gehören (Muckenfuß, 1995, S. 154). Als Ausdrucksformen physikalischer Konzepte müssen sie als Modellobjekte und das Ergebnis einer langen Suche betrachtet werden, was in der Regel nicht erfolgt. Wissenschaftliche Arbeitsweisen können allerdings erst durch Experimente eingeübt werden, die das Überprüfen einer Hypothese beinhalten. Strukturmodelle wissenschaftlicher Untersuchungen (SI) bzw. des wissenschaftlichen Denkens (scientific reasoning, vgl. Giere, Bickle & Mauldin, 2006) haben nach Mayer (2007) das Ziel, naturwissenschaftliche Erkenntnisgewinnung als komplexen Problemlöseprozess abzubilden, der mehrere Schritte zu durchlaufen hat:

- Naturwissenschaftliche Fragen formulieren
- Hypothesen generieren
- Untersuchungen planen
- Daten analysieren und Schlussfolgerungen ziehen

Die ersten drei Schritte bilden die Vorbereitung (Planung) eines Experiments, während der letzte Schritt zur Nachbereitung (Auswertung) gehört. Für die Unterrichtspraxis werden sie von Nawrath, Maiseyenko und Schecker (2011) mit unmittelbar mit der Durchführung zusammenhängenden Schritten ergänzt:

- Versuch funktionsfähig aufbauen
- beobachten/messen/dokumentieren

3 Physikalische Modellbildung

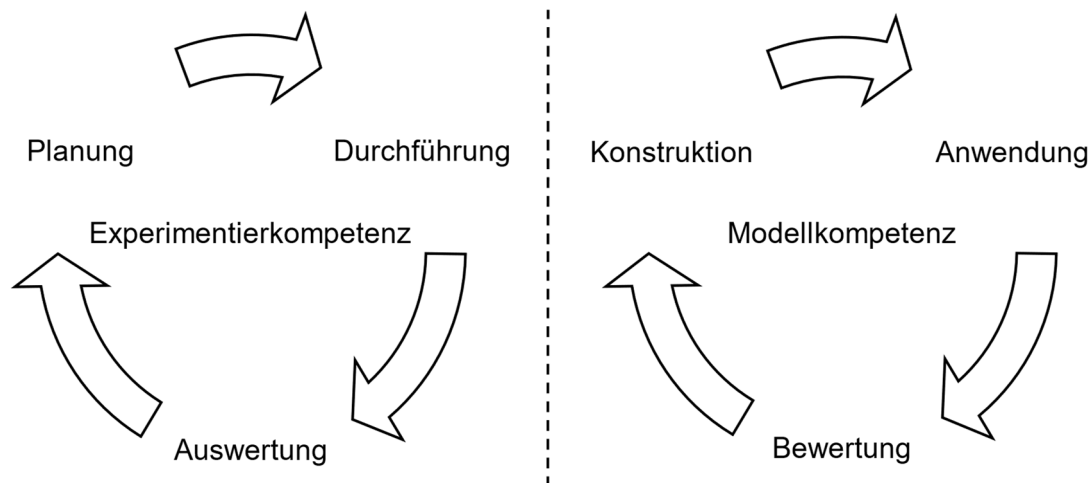


Abbildung 11: Klassische Aufteilung von Experimentier- und Modellkompetenz

Die grobe Unterteilung in die Phasen Planung, Durchführung und Auswertung sowie eine unterschiedliche Anzahl ähnlicher Schritte ist in vielen Beschreibungen experimenteller Kompetenz vorzufinden, die als Grundlage für schriftliche und praktische Experimentiertests (vgl. Schreiber, 2012; Theyßen, Schecker, Neumann, Eickhorst & Dickmann, 2016) oder Interventionsstudien dienen (vgl. Muth, 2018; Winkelmann, 2015). Auch für die Arbeit mit Modellen lässt sich ein ähnlicher Dreischritt formulieren: Konstruktion, Anwendung und Bewertung. Allerdings erscheinen in dieser Betrachtung Modell und Experiment fälschlicherweise als unabhängige Komponenten der Naturwissenschaft (siehe Abbildung 11).

Die Vermittlung experimentierbezogener Fähigkeiten ist eines der Ziele, die auch Lehrkräfte mit dem Experimentieren im naturwissenschaftlichen Unterricht verbinden. Eine Befragung unter Physiklehrkräften hat ergeben, dass für im Unterricht durchgeführte Experimente ganz unterschiedliche Schwerpunkte im Experimentierprozess gesetzt werden (Karaböcek & Erb, 2015). Dabei kann es sich um (a) die Aneignung einer wissenschaftlichen Arbeitsweise handeln, die in der Planungsphase erläutert wird, oder (b) den Ausbau praktischer Fähigkeiten, die während der eigenständigen Durchführung eines Experiments erforderlich sind. Auch (c) der Umgang mit experimentell ermittelten Daten, die in einer quantitativen Auswertung weiterverarbeitet werden, kann die zentrale Rolle während einer Unterrichtsstunde einnehmen. Daneben wird als übergeordnetes Ziel die Vermittlung von Fachwissen genannt. Gleichzeitig betrachten sowohl Lehrkräfte als auch Forschende der Didaktik Fachwissen als ein relevantes lernbezogenes Merkmal, wenn es um den Erfolg eines eigenständigen, hypothesengeleiteten

Experiments geht, insbesondere während der Planung und Auswertung (Härtig, Neumann & Erb, 2017). Es sind Lernschwierigkeiten und Fehlschlüsse zu erwarten, wenn ein Testen von Hypothesen Fachwissen erfordert, das im Unterricht durch ein entsprechendes Experiment aufgebaut werden soll.

Klahr und Dunbar (1988) teilen auf Basis ihrer Laborstudien das Vorgehen bei wissenschaftlichen Untersuchungen in eine Suche im Hypothesen- und Experimentierraum auf (Scientific Discovery as Dual Search, SDDS). Die Suche im Hypothesenraum zeichnet sich nach dem Kennenlernen des Systems, das mit einer Fragestellung verbunden ist, durch zwei Hauptkomponenten aus:

1. *Generate frame*: Konstruktion eines Modells, das mögliche Wechselwirkungen zwischen bestimmten Variablen des Systems enthält.
2. *Assign slot values*: Verwendung bestimmter Werte zum Generieren von konkreten Vorhersagen.

Die Forschenden reden an dieser Stelle von *frames* statt von Modellen. Allerdings beschreiben sie die Eigenschaften eines mentalen Modells: Ein *frame* wird von den Lernenden mental konstruiert. Darin sind die hypothetischen Bestandteile und Funktionen des untersuchten Systems vorab festgelegt. Ihnen können Werte zugewiesen werden, was den Fokus des Experimentierens einschränkt (Klahr & Dunbar, 1988, S. 19). Im Experimentierraum werden die so formulierten Hypothesen am System getestet, bevor eine Entscheidung über den erreichten Erkenntnisgewinn gefällt werden kann. Diese Sicht auf die Erkenntnisgewinnung deckt sich mit den vorhergehenden Ausführungen zur grundlegenden Rolle von Modellen im Hinblick auf die Generierung begründeter Hypothesen in der Planungsphase eines Experiments (siehe Kapitel 2.2).

Abrahams und Millar (2008) analysieren die Durchführung von Experimenten in typischen Unterrichtsstunden und kommen zu dem Schluss, dass Lernende zwar dazu gebracht werden können, das zu tun, was mit den Materialien beabsichtigt wurde. Aber das heißt nicht, dass sie durch das Experimentieren auch dazu gebracht werden, die beabsichtigten wissenschaftlichen Ideen zu verwenden, um ihre Handlungen zu steuern und über die von ihnen gesammelten Daten nachzudenken. Für ein zielgerichtetes Experimentieren sollte deshalb eine unvoreingenommene Auseinandersetzung mit aus wissenschaftlichen Prinzipien abgeleiteten Beschreibungen und Visualisierungen des Phänomens vorausgehen. Dadurch wird dem Experimentierprozess die scheinbare Beliebigkeit des forschend-entdeckenden Vorgehens genommen. Stattdessen hat das Experiment die Testung eines mentalen Modells zum Ziel, das anhand phänomenologischer

3 Physikalische Modellbildung

Betrachtungen und theoretischer Überlegungen mit dafür konstruierten Modellobjekten aufgebaut wurde. Bei dieser Sicht auf die Erschließung der Welt werden Lernende befähigt, Phänomene wahrzunehmen, schließlich von ihnen abzusehen und das gewonnene abstrakte Werkzeug wieder zur Deutung konkreter Situationen zu nutzen (Muckenfuß, 2001, S. 77). Im Folgenden werden die Vorüberlegungen zunächst zu einem didaktischen Konzept ausgeweitet (siehe Kapitel 3.1), um anschließend die unterrichtspraktische Umsetzung anhand eines Beispiels vorzustellen (siehe Kapitel 3.2).

3.1 Kreislauf der Erkenntnisgewinnung

Unabhängig davon, welche Anwendungen oder welche Modellierungsmethoden eingesetzt werden (z. B. Gleichungen, Flussdiagramme oder geometrische Konstruktionen), nimmt in dem Konzept der physikalischen Modellbildung einen zentralen Platz die folgende Vorstellung ein: Jegliche Ideen und Erkenntnisse über natürliche oder vom Menschen geschaffene Phänomene werden zunächst in Form von mentalen Modellen geordnet, die auf abstrakten naturwissenschaftlichen Ideen und Prinzipien basieren. Die infolgedessen geschaffenen Modellobjekte sollten insofern in der Lage sein, nicht nur das dahinter liegende physikalische Konzept zu visualisieren, sondern auch das Verhalten des untersuchten Systems innerhalb der Modellgrenzen zu simulieren. Es müsste sich demnach um experimentierfähige Modelle handeln, die ein *virtuelles Experimentieren* ermöglichen. Die aus den mentalen Modellen abgeleiteten Hypothesen müssen sich jedoch an dem realen Experiment messen lassen, bevor von einer Erkenntnis in einem abgeschlossenen Prozess der *Modellbildung* und nicht nur einer hypothetischen *Modellierung* gesprochen werden kann. Die „Reflexion auf das eigene Tun“ im Sinne einer Überprüfung des diskutierten Modells ist unverzichtbar, wenn es um die „Modellierung außermathematischer Phänomene“ geht (Winter, 1995, S. 43).

Im Folgenden wird der *Kreislauf der Erkenntnisgewinnung* als Strukturhilfe für Lernumgebungen vorgestellt, die Modelle und Experimente in einem gemeinsamen Problemlöseprozess anbieten (siehe Abbildung 12). Die gewählte Bezeichnung grenzt sich von anderen Modellierungskreisläufen ab, die den Schwerpunkt auf die Erstellung eines Modells legen (siehe Kapitel 2.3.2), während hier der gesamte Prozess der physikalischen Modellbildung von der Beobachtung bis zur neuen Erkenntnis bezüglich eines Phänomens abgedeckt wird. Er ist als Synthese bisheriger wissenschaftstheoretischer Darstellungen zum Modellbegriff,

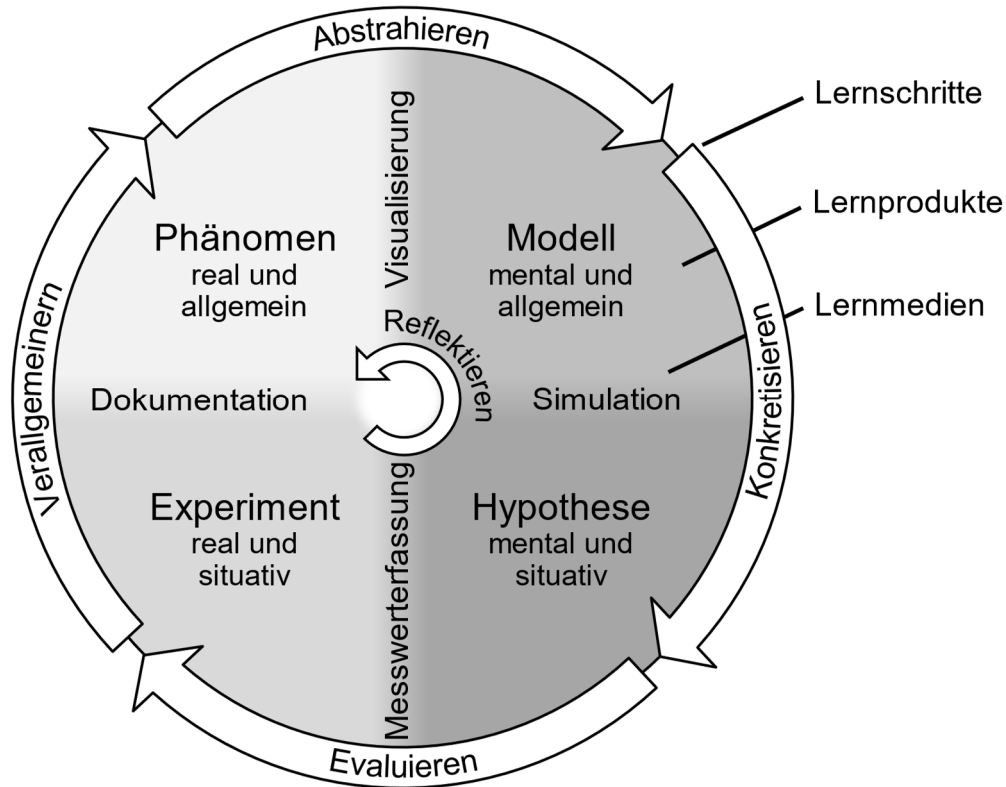


Abbildung 12: Kreislauf der Erkenntnisgewinnung mit Lernschritten, -produkten und -medien

zum Modellierungsprozess (siehe Kapitel 2) und zum Experimentieren zu verstehen.

Als wesentliche Unterrichtsgegenstände werden (a) Phänomen, (b) Modell, (c) Hypothese und (d) Experiment betrachtet, die im Laufe des Kreislaufs als Lernprodukt entwickelt werden und als Ausgangspunkt für das weitere Vorgehen dienen. Die *Lernprodukte* sind in der Darstellung des Kreislaufs ihren Eigenschaften entsprechend angeordnet (siehe Kapitel 3.1.1). Oben befinden sich Unterrichtsgegenstände, die einen allgemeinen Charakter aufweisen, während unten situativ bedingte Umstände berücksichtigt sind. Dagegen befinden sich auf der linken Seite in der Realität verankerte Elemente, während auf der rechten Seite abstrakte Strukturen und mentale Schlussfolgerungen vorliegen. Davon leiten sich jeweils die *Lernschritte* ab, die beim Übergang von der allgemeinen in die situative oder von der realen in die mentale Ebene und umgekehrt notwendig sind (siehe Kapitel 3.1.2). Der Pfeil in der Mitte unterstreicht zudem die Notwendigkeit der Reflexion der Lernschritte, die in Rückrichtung vom Experiment über Hypothese und Modell stattfindet und zum Verständnis des Phänomens führt. Außer-

3 Physikalische Modellbildung

dem werden relevante Werkzeuge und Darstellungen spezifiziert, die als *Lernmedien* eine Brücke zwischen den Ebenen darstellen und den Übergang erleichtern (siehe Kapitel 3.1.3). In dieser Arbeit werden die mit der DGS *GeoGebra* erstellten dynamischen Modelle zum einen als Simulationen und Visualisierungen (siehe Kapitel 3.1.4), zum anderen als Unterstützungen bei der Überprüfung von Hypothesen in AR betrachtet (siehe Kapitel 3.1.5). Außerdem werden im Folgenden Thesen aufgestellt, die die Grundlage für die praktische Umsetzung der theoretischen Überlegungen darstellen.

3.1.1 Lernprodukte

Bei Phänomenen und zugehörigen Modellen liegt der Fokus auf der Beschreibung eines Systems mit einer gewissen Anzahl an Eigenschaften und Zusammenhängen, sei es rein phänomenologisch oder mit naturwissenschaftlichen Prinzipien. Es handelt sich dabei um eine *allgemeine* Charakteristik, die es erlaubt, den gewünschten Effekt in verschiedenen Situationen und experimentellen Kontexten zu replizieren. Sie sind unabhängig von der Art des Messgeräts und den Methoden der Datenverarbeitung und Datenanalyse – also den *situativen* Gegebenheiten, die zu den Beobachtungen und Messwerten führen (Bogen & Woodward, 1988, S. 317). Die im Rahmen eines durchgeführten Experiments ermittelten Ergebnisse sowie die im Vorfeld aufgestellten Prognosen oder im Nachhinein getätigte Deutungen sind hingegen stets an die konkrete Situation und Umsetzung im Labor oder Klassenraum gebunden.

Es werden zwar nicht alle Phänomene und Experimente in der unmittelbaren Umgebung beobachtet und durchgeführt, dennoch finden die Prozesse in der *realen* Welt statt. Währenddessen sind sowohl Modelle als auch die abgeleiteten Hypothesen als gedankliche Konstrukte im Kern *mental*. Im Laufe der Erkenntnisgewinnung setzen sich Lernende somit mit Inhalten auseinander bzw. stellen Lernprodukte her, die sich, was den Situations- und den Realitätsbezug angeht, wesentlich unterscheiden. Eine solche Betrachtung der vier Unterrichtsgegenstände, mit denen sich Lernende im Laufe der physikalischen Modellbildung entlang des Kreislaufs der Erkenntnisgewinnung als Lernprodukte auseinandersetzen, eröffnet ein zweidimensionales Spannungsfeld (siehe Abbildung 13):

1. Gültigkeitsbereich: situativ ↔ allgemein
2. Abstraktionsgrad: real ↔ mental

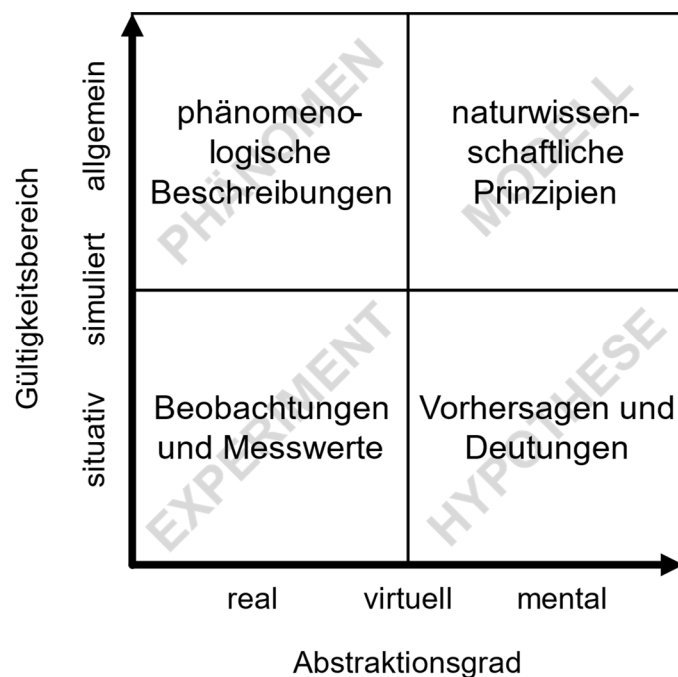


Abbildung 13: Spannungsfeld physikalischer Modellbildung

These 1 Die Erkenntnisgewinnung im Laufe der physikalischen Modellbildung verläuft in einem zweidimensionalen Spannungsfeld zwischen situativen Vorgängen und allgemeinen Zusammenhängen sowie realen Prozessen und mentalen Konstrukten.

3.1.2 Lernschritte

Um die Übergänge zwischen den Ebenen zu absolvieren, sind unterschiedliche kognitive Fähigkeiten erforderlich:

1. Verallgemeinern: situativ → allgemein
2. Abstrahieren: real → mental
3. Konkretisieren: allgemein → situativ
4. Evaluieren: mental → real

Lernende müssen diese Schritte durchführen, um nicht nur der naturwissenschaftlichen Erkenntnisgewinnung gerecht zu werden, sondern auch um die Relevanz der einzelnen Bereiche zu erkennen. Bemerkenswerterweise liefert das aus erkenntnistheoretischen Überlegungen abgeleitete Spannungsfeld vier Lernschritte, die Parallelen aufweisen zu den in Kapitel 1 bereits erwähnten „Barrieren“ im Physikunterricht von Raufuß (1989, zitiert nach Fruböse, 2010, S. 390):

3 Physikalische Modellbildung

1. Kommunikation unpersönlicher, allgemeingültiger Erkenntnisse
2. Übertragung einer komplexen Realität in eine abstrakte Gedankenwelt
3. Formulierung von Schlussfolgerungen mithilfe der Mathematik
4. Erfassung nicht direkt wahrnehmbarer Vorgänge durch Messgeräte²⁰

Die Erkenntnisgewinnung, die im Unterricht stattfindet, nimmt allerdings nicht immer den idealisierten Weg und vernachlässigt oder überspringt oft einzelne Unterrichtsgegenstände, was zu folgenden vier Fällen führen kann:

- Vernachlässigung des Verallgemeinerns: Anhand einer einzelnen Beobachtung wird ein Modell eingeführt, ohne dass vorher ein Phänomen identifiziert wurde.
- Vernachlässigung des Abstrahierens: Für die grundlegenden Zusammenhänge eines Phänomens soll eine Hypothese formuliert werden, ohne dass vorher ein Modell konstruiert wurde.
- Vernachlässigung des Konkretisierens: Zu einem allgemein behandelten Modell wird ein Experiment durchgeführt, ohne dass vorher Hypothesen formuliert wurden.
- Vernachlässigung des Evaluierens: Hypothesen eines Modells werden als Erklärungen akzeptiert, ohne dass vorher ein Experiment durchgeführt wurde.

Es liegt die Vermutung nahe, dass wenn einzelne Unterrichtsgegenstände nicht explizit entwickelt werden, mit ihnen zusammenhängende Kompetenzen nicht gefördert werden. Bleibt der Unterricht beispielsweise vor allem in dem allgemein-mental Bereich physikalischer Begriffe und Gesetze ohne Anwendung auf einen konkreten Sachverhalt, erinnert das an den „Modus des Physiktreibens“ nach Muckenfuß (1995):

²⁰ Der Formulierung und Reihenfolge der vier Punkte wurde angepasst. Der genaue Wortlaut ist wie folgt:

- 1.) *Nirgendwo sonst wird so rigoros von der komplexen und alle Sinne ansprechenden Realität in eine nüchterne Gedanken- und Zahlenwelt abstrahiert.*
- 2.) *Nirgends spielen Apparate (zum Messen) eine solch bedeutende Rolle und verengen damit unseren allgemeinen Erfahrungsbegriff.*
- 3.) *Nirgendwo ist die Fachsprache so künstlich; denn in der Physik ist es gar keine Sprache aus Worten, sondern die Mathematik.*
- 4.) *Nirgendwo sonst werden untereinander die Einsichten in einem derart unpersönlichen Stil kommuniziert.*

Wenn man den Erkenntnisweg dort beginnt und beendet, wo die objektiven, von Qualität und Subjektivität befreiten Kenntnisse entstehen, [...] dann fallen Subjekt und Objekt, Mensch und Weltsicht dem Reduktionismus im Sinne eines bleibenden Verlusts anheim. Übrig bleibt im günstigen Fall das blanke Verfügungswissen. (S. 113)

These 2 Die Förderung von Experimentier- und Modellkompetenzen hängt von der Forderung der kognitiven Fähigkeiten in Lernschritten an den entsprechenden Übergängen im Spannungsfeld der physikalischen Modellbildung ab.

Des Weiteren sollte die Reflexion eines Unterrichtsgegenstandes nicht nur positiv ausfallen, damit ein Lernschritt wiederholt werden kann.

- Wiederholung des Evaluierens: Die Messwerte können die Hypothesen nicht eindeutig stützen oder verwerfen, sodass neue Ergebnisse im angepassten Experiment ermittelt werden.
- Wiederholung des Konkretisierens: Endgültig verworfene Hypothesen führen zunächst zum Modell zurück, sodass neue Hypothesen aufgestellt werden.
- Wiederholung des Abstrahierens: Das ursprüngliche Modell beschreibt nicht alle gewünschten Aspekte des Phänomens, sodass ein alternatives Modell betrachtet wird.
- Wiederholung des Verallgemeinerns: Die Beobachtungen gehen über das modellierte Phänomen hinaus, sodass ein weiteres Phänomen identifiziert wird.

Wenn mehrere Anläufe zu einem Lernschritt erfolgen, dann kann anhand dieser Beispiele das Verständnis zur Erkenntnisgewinnung und zum Wissen explizit gemacht werden:

- Falsifizierbarkeit des Wissens in evaluierten Experimenten
- Vorläufigkeit des Wissens in konkreten Hypothesen
- Mannigfaltigkeit des Wissens in abstrakten Modellen
- Subjektivität des Wissens in allgemeinen Phänomenen

These 3 Das Verständnis der Natur der Naturwissenschaften (NoS) zur Erkenntnisgewinnung (Wissen über Wissen bzw. Metawissen) hängt von der Reflexion und Wiederholung der Lernschritte ab.

3.1.3 Lernmedien

Während der physikalischen Modellbildung sind mehrere Ebenenwechsel nötig, sowohl was den Abstraktionsgrad als auch den Gültigkeitsbereich der Lehrinhalte und Lernprodukte angeht (siehe These 1 in Kapitel 3.1.1). Daraufhin können vier Klassen von Lernmedien unterschieden werden, die sich an den postulierten Übergängen anbieten: Dokumentation, Visualisierung, Simulation und Messwerterfassung. Diesen Lernmedien können Eigenschaften zugeordnet werden, die sich im Spannungsfeld zwischen den Ausprägungen *real* und *mental* sowie *allgemein* und *situativ* verorten lassen (siehe Abbildung 13). Die Zeichnung eines Atoms auf dem Papier oder auf dem Bildschirm ist zwar *real*, doch gleichzeitig stellt sie auch ein Modellobjekt dar, das als Ausdrucksform eines mentalen Modells eines Atoms dient. Solche idealisierten Darstellungen abstrakter Strukturen, die auf naturwissenschaftlichen Prinzipien basieren und stets mit Einschränkungen sowie subjektiven Einflüssen verbunden sind, werden als *virtuell* bezeichnet (siehe Kapitel 2.2). In einem mentalen Modell eines Phänomens werden wesentliche Elemente und allgemeine Strukturen festgelegt, wobei es zunächst nicht auf die Anfangswerte ankommt. In einer Hypothese für ein bestimmtes Experiment hingegen werden alle relevanten situativen Umstände berücksichtigt, die einen Einfluss auf die Vorhersage und den Ausgang des Experiments einnehmen könnten. Dazwischen lassen sich innerhalb sinnvoller Grenzen beispielhafte Situationen betrachten und Berechnungen durchführen, was zu *simulierten* Ergebnissen führt. Auf diese Weise lassen sich Funktionen der Lernmedien im Spannungsfeld der physikalischen Modellbildung spezifizieren:

- Original erfassen: Dokumentationen von situativen Beobachtungen in Form von Fotos oder Videos erlauben, allgemeine Phänomene zu identifizieren.
- Modell konstruieren: Visualisierungen mentaler Modelle in Form von Konstruktionen oder Animationen erleichtern das Abstrahieren vom realen Phänomen.
- Modell anwenden: Simulationen in Form von numerischen Berechnungen oder speziellen Apps bzw. Applets helfen, aus allgemeinen Modellen situative Hypothesen abzuleiten.
- Modell bewerten: Messwerterfassung mithilfe von analogen oder digitalen Messgeräten und ihre Darstellung ermöglicht die Überprüfung mentaler Hypothesen in realen Experimenten.

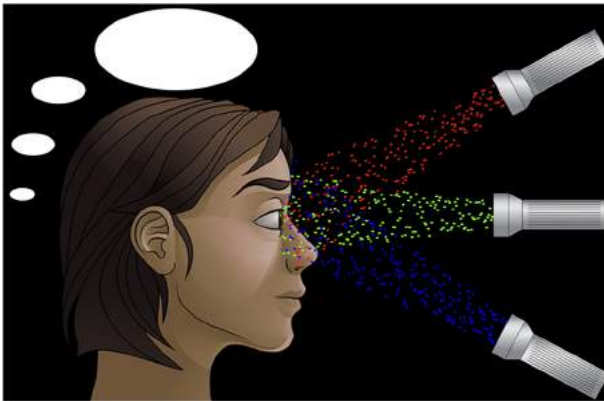


Abbildung 14: Simulation zur Farbwahrnehmung

Viele im Physikunterricht eingesetzte sowohl klassische als auch neue Medien lassen sich unter diesen vier Gesichtspunkten betrachten und im Hinblick auf ihren Einsatz an der aus epistemologischer Sicht richtigen Stelle reflektieren. Demnach eignen sich beispielsweise Simulationen zur Untersuchung komplizierter Systeme, um daraus hypothetische Aussagen über das Verhalten des realen Systems leichter abzuleiten. Zur Einführung eines zu untersuchenden Phänomens oder gar als Ersatz des realen Experiments eignen sie sich in dieser Hinsicht nicht. Ansonsten könnten den Lernenden die Besonderheiten und Grenzen der vier Bereiche nicht deutlich gemacht werden, da beobachtbare und konstruierte Inhalte sowie kontextabhängige und systematische Vorgänge vermischt werden (siehe These 2 in Kapitel 3.1.2). Die unter diesem Gesichtspunkt ausgewählten oder erstellten Lernmedien dürfen demnach keine Darstellungen enthalten, die Objekte verschiedener Bereiche, z. B. der mentalen Modellwelt und der realen Welt, als gleichwertige Entitäten enthalten. In einer Simulation zur Farbwahrnehmung von Gruneich und Perkins (n. d.) aus dem Projekt *PhET interaktive Simulationen* wird beispielsweise ein real wirkender Kopf mit modelhaften Farbteilchen aus real wirkenden Taschenlampen bestrahlt (siehe Abbildung 14). Diese Darstellung könnte gerade jungen Lernenden eine nicht sonderlich hilfreiche Vorstellung bezüglich der Natur des Lichts aufzeigen (synthetisches Modell, siehe Kapitel 2.3).

| |
|--|
| These 4 Die Lernschritte werden mit Lernmedien unterstützt, die für die Übergänge geeignete Darstellungen enthalten. |
|--|

Im Folgenden werden mit der DGS *GeoGebra* erstellte dynamische Modelle als Lernmedien vorgestellt, die an den verschiedenen Schnittstellen der Erkenntnisgewinnung eingesetzt werden können.

3.1.4 Dynamische Modelle

Die Bezeichnung *dynamisches Modell* unterstreicht die veränderlichen und beweglichen Eigenschaften der im Zentrum dieser Arbeit stehenden Modellobjekte. Dynamische Modelle zeichnen sich dadurch aus, dass sie variable Bestandteile enthalten. Im Gegensatz zu statischen Zeichnungen, Diagrammen oder Konstruktionen verfügen sie über veränderliche Parameter, deren Änderungen sich auf alle davon abhängenden Parameter des Modells auswirken (siehe Kapitel 2.4.2). Im Gegensatz zu Animationen laufen die Veränderungen im modellierten System nicht automatisch oder nach einem vordefinierten Muster ab, sondern können eigenständig vorgenommen werden. Solche Modellobjekte sind deshalb mehr als nur Momentaufnahmen des Originals oder Repräsentationen von Spezialfällen innerhalb eines modellierten Systems. Bezogen auf natürliche oder technische Phänomene *visualisieren* dynamische Modelle als virtuelle Nachbildungen die Struktur des allgemeinen Phänomens aus einem naturwissenschaftlichen Blickwinkel.

These 5 Dynamische Modelle sind dazu geeignet, dass Lehrende abstrakte naturwissenschaftliche Prinzipien visualisieren.

Andererseits ermöglichen sie auch eine explorative Untersuchung, indem das Verhalten des Systems innerhalb der Modellgrenzen *simuliert* wird. Während der Arbeit mit einem dynamischen Modell können somit auch Vermutungen über die Folgen einer Variation angestellt werden, wenn das Ergebnis zunächst noch nicht bekannt ist. Auf diese Weise kann eine individuelle Variation an einem dynamischen Modell zu einem *virtuellen Experiment* werden (Erb, 2017, S. 5).

These 6 Die Arbeit mit einem dynamischen Modell ist dazu geeignet, dass Lernende Hypothesen über das modellierte Phänomen formulieren.

Dynamische Modelle als Lernmedien übernehmen in der physikalischen Modellbildung sowohl die Rolle von Visualisierungen als auch Simulationen. Explorative Lernaktivitäten an dynamischen Modellen sollen damit zum einen den Aufbau eines mentalen Modells zum allgemeinen Phänomen ermöglichen, zum anderen auch situative Hypothesen hervorbringen. Hinzu kommt die Möglichkeit, das reale Experiment mithilfe von AR-Technologie mit dem dynamischen Modell zu erweitern (siehe Kapitel 3.1.5). Das in Abbildung 15 dargestellte Beispiel zeigt mögliche Lernmedien zur Behandlung des Phänomens des Spiegelbildes am ebenen Spiegel innerhalb der physikalischen Modellbildung:

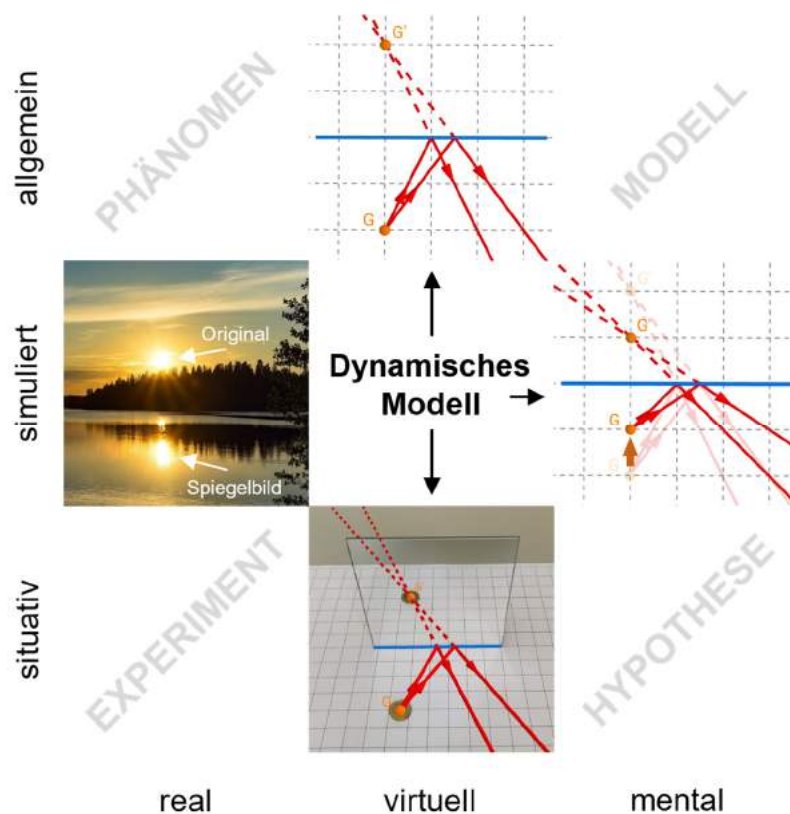


Abbildung 15: Rolle eines dynamischen Modells innerhalb der Modellbildung am Beispiel der Entstehung des Spiegelbildes

1. Ein Foto der untergehenden Sonne an einem See dokumentiert die situative Beobachtung von zwei Sonnen (Original und Spiegelbild im See), was zum allgemeinen Phänomen und zur Fragestellung bezüglich der Entstehung und Lage des Spiegelbildes führt (links).
2. Ein mit der DGS *GeoGebra* erstelltes dynamisches Modell visualisiert das mentale Modell zur physikalischen Entstehung des Spiegelbildes, welches im Gegensatz zum realen Phänomen abstrakt ist (oben).
3. Die Verschiebung des Gegenstandspunktes G in dem Modell auf einem Koordinatengitter simuliert verschiedene Positionen von Original und Spiegelbild, woraus die Hypothese zur Lage des Spiegelbildes abgeleitet werden kann (rechts).
4. Die Messwerterfassung im realen Experiment erfolgt klassischerweise mithilfe einer Glasscheibe als Spiegel und eines Lineals, was die Überprüfung der Hypothese ermöglicht. Alternativ wird durch das Einblenden des dynamischen Modells in den Aufbau ein AR-Experiment durchgeführt (unten).

3 Physikalische Modellbildung

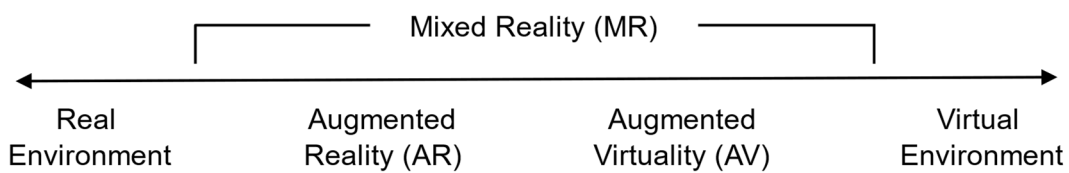


Abbildung 16: Virtuality Continuum (nach Milgram & Kishino, 1994)

3.1.5 Augmented Reality-Experimente²¹

Die Entwicklung leistungsfähiger Computer und neuartiger Bildschirmtechnologien eröffnet verschiedene Möglichkeiten für immersive Erfahrungen. Mit *Immersion* wird das durch visuelle und auditive Reize vermittelte Gefühl bezeichnet, sich in einer virtuellen oder durch virtuelle Objekte erweiterten Welt zu befinden. Je immersiver die mit digitalen Hilfsmitteln erzeugte Umgebung ist, desto größer ist ihre Fähigkeit, die Person in eine Welt eintauchen zu lassen, die nicht der Realität entspricht (Bartle, 2004, S. 154). Das subjektive Präsenzerleben steht in dieser Definition über den Qualitätsmerkmalen der verwendeten Technik (Lee, 2004).

Milgram und Kishino (1994) formulieren in ihrer Taxonomie für derartige Technologien das Virtuality Continuum, an dessen Enden sich vollständig reale oder virtuelle Umgebungen befinden (siehe Abbildung 16). Dazwischen sind verschiedene Mischformen denkbar, die als Mixed Reality (MR) bezeichnet wurden. Spezifiziert werden dabei die Bezeichnungen AR (Erweiterung einer realen Umgebung durch virtuelle Objekte) und Augmented Virtuality (AV, Erweiterung einer virtuellen Umgebung durch reale Objekte). Eine erweiterte Definition von Azuma et al. (2001) für AR enthält zusätzlich die Notwendigkeit, dass reale und virtuelle Objekte im Bezug zueinander angezeigt und ausgerichtet werden. Allerdings fällt eine klare Definition oder Abgrenzung der verschiedenen Bezeichnungen in diesem Bereich bis heute schwer. Als Überbegriff für immersive Technologien ist auch der Begriff Extended Reality (XR) geläufig, während MR in Abgrenzung zu AR für eine höhere Interaktion und Verschmelzung der virtuellen und realen Umgebungen steht (Marr, 2019). Mit AR ist in der Regel die Darstellung virtueller Objekte im realen Raum gemeint, die sich perspektivisch an die Bewegung der Person anpasst.

²¹ Dieses Kapitel enthält Abschnitte, die der Argumentation bereits publizierter Beiträge folgen (vgl. Teichrow & Erb, 2020a, 2020b, 2020c, 2022).

Als kennzeichnende Merkmale immersiver Technologien treten der betrachtete *Raum* und die in diesem Raum befindlichen *Objekte* auf. Sie nehmen die Ausprägungen *real* oder *virtuell* an. Immer mehr Lehr-Lernszenarien und auch das Experiment als zentrales Medium im naturwissenschaftlichen Unterricht werden durch virtuelle Elemente erweitert oder mit digitalen Medien ersetzt. Die virtuellen Bestandteile basieren auf theoretischen Vorüberlegungen und enthalten computergenerierte Darstellungen, die der Realität nur bedingt entsprechen (siehe Kapitel 3.1.3). Um Ziele und Funktionen der eingesetzten Medien zu unterscheiden, werden neben den Dimensionen Raum und Objekte in der vorgeschlagenen Klassifikation für digitalisierte Experimentierumgebungen als drittes Merkmal die zu vermittelnden *Inhalte* hinzugezogen (siehe Tabelle 3). Die Kombination von ausschließlich realen oder virtuellen Merkmalen führt zu zwei Klassen, die an den Enden des Kontinuums stehen und als *Real Environment* und *Virtual Environment* bezeichnet werden. Mithilfe digitaler Medien können einzelne Merkmale vorwiegend eine andere Ausprägung annehmen und dadurch zu einer anderen Klasse führen. Welche Formen digitalisierter Experimente dadurch beschrieben werden können und worin die prinzipiellen Unterschiede liegen, wird in Teichrow und Erb (2020b) weiter ausgeführt. Im Rahmen der vorgeschlagenen Klassifikation werden digitalisierte Experimente als AR-Experimente bezeichnet, wenn sie im realen Raum stattfinden und reale Objekte eines Experiments mit virtuellen ergänzt werden. Die virtuellen Objekte vermitteln virtuelle Inhalte und tragen damit zum Verständnis der realen Inhalte des Experiments bei.

Mit der AR-Technologie wird entweder das Sichtfenster einer Brille oder die Ansicht der realen Umgebung durch die Kamera auf dem Bildschirm eines Mobilgeräts in Echtzeit mit virtuellen Objekten überlagert. Entscheidend ist, dass bei Veränderung der Position der betrachtenden Person die virtuellen Objekte an der

Tabelle 3: Merkmale digitalisierter Experimentierumgebungen mit den Ausprägungen real oder virtuell

| | Raum | Objekte | Inhalte |
|----------|--|---|--|
| real | Ansicht der unmittelbaren Umgebung direkt oder indirekt als Aufnahme | Objekte zur Erzeugung eines Phänomens | mit den Sinnen wahrnehmbare Phänomene |
| virtuell | 2D oder 3D Grafik-Ansicht auf einem Bildschirm | Objekte zur Visualisierung naturwissenschaftlicher Konzepte | mit Modellen erschließbare Zusammenhänge |

3 Physikalische Modellbildung

zugewiesenen Stelle bleiben, sodass ihre Anwesenheit im Raum natürlich erscheint (Carmigniani & Furht, 2011). Die Programmierschnittstellen *ARCore* von *Google* oder *ARKit* von *Apple* ermöglichen Smartphones und Tablets, die Umgebung zu erkennen und 3D-Objekte im Kamerabild in der richtigen Perspektive zu platzieren. Aktuelle Mobilgeräte verfügen in der Regel über die erforderliche Hardware: Im Kamerabild werden zunächst markante Punkte erkannt. Die visuellen Informationen werden mit Messungen des Beschleunigungssensors und Gyroskops kombiniert, sodass die Position und Ausrichtung der Kamera relativ zur Umgebung in Echtzeit abgeschätzt werden können. Die Software platziert die 3D-Objekte so in das Kamerabild, dass Position und Ausrichtung der virtuellen Kamera mit der Kamera des Geräts übereinstimmen. Reale Situationen werden somit ohne zusätzliche Hardware wie AR-Brillen um virtuelle Informationen erweitert. Im Bildungsbereich können abstrakte Konzepte mithilfe dieser Technik einen erkennbaren Alltagsbezug erhalten und verständlicher werden (Bloxham, 2014). Lernaktivitäten, die mithilfe einer solchen Technologie realisiert werden, wären ohne den Einsatz digitaler Medien in der Form nicht möglich und haben bei entsprechender Einbindung in den Unterricht das Potenzial, große Effekte auf das Lernen zu erzielen. Meta-Analysen haben gezeigt, dass mit AR das Lernen in verschiedenen Inhaltsbereichen (Garzón & Acevedo, 2019) und mit verschiedenen Unterrichtsmethoden verbessert werden kann (Garzón, Kinshuk, Baldiris, Gutiérrez & Pavón, 2020). Allerdings besteht noch umfassender Bedarf an Gestaltungsempfehlungen für Lernaktivitäten in AR.

In der hier diskutierten Umsetzung werden mit *GeoGebra* erstellte dynamische Modelle als Visualisierungen abstrakter wissenschaftlicher Ideen und Konzepte verwendet (siehe Kapitel 3.1.4), die mit der App *GeoGebra 3D Rechner* auf einem Smartphone oder Tablet geöffnet und auf eine von der Kamera erkannte Fläche eingeblendet werden können. Die Übereinstimmung zwischen dem Modell und dem experimentellen Aufbau muss von der interagierenden Person allerdings selbstständig mit intuitiven Touch-Gesten und Schiebereglern hergestellt werden. Im Vergleich zu anderen thematisch eng ausgerichteten AR-Apps ist eine höhere Motivation von Lehrenden und Lernenden zu erwarten, da sie ihre selbstständig erstellten oder zuvor bearbeiteten dynamischen Modelle in eine reale Umgebung einfügen und anpassen können.

AR-Experimente grenzen sich vor allem von Virtual Reality-Lernumgebungen (VR) dadurch ab, dass das reale Experiment samt seinen natürlichen Beobachtungen und Messunsicherheiten vollständig erhalten bleibt und nicht etwa durch

realistische 3D-Modelle ersetzt wird. Diese Art der digitalisierten Experimente ist vor allem dann hilfreich, wenn die entsprechenden Experimentiermaterialien nicht verfügbar sind oder der unerfahrene Umgang potenzielle Gefahren für Mensch und Material mit sich bringt (vgl. Lindlahr & Wendt, 2016). Experimente mit Kopien realer Experimentiermaterialien in 3D, die demselben Prinzip folgen, gibt es auch als AR-Anwendungen. Von dem Wechsel von einem virtuellen Labortisch auf einen realen Tisch im Wohn- oder Klassenzimmer ist allerdings keine wesentliche Verbesserung der Lernerfahrung zu erwarten. Für eine begriffliche Abgrenzung wird für diese Art der Experimente die Bezeichnung MR vorgeschlagen, da es sich hierbei um eine *Vermischung* des realen und virtuellen Raumes handelt (Teichrew & Erb, 2020b). In einem anderen Ansatz wird die kognitive Entlastung der Lernenden mithilfe von AR bei der Erfassung von Messdaten angestrebt. Dazu wird ein Experiment mit digitalen Sensoren so aufgerüstet, dass eine passende Software die Messdaten erfasst und mit einer AR-Brille oder einem Mobilgerät mit AR-Funktion an der entsprechenden Stelle gemäß der CTML (siehe Kapitel 2.1) im Experiment visualisiert (vgl. Thees et al., 2021). Im Wesentlichen findet ein Ersatz der analogen Messmethode durch eine digitale statt, was im SAMR-Modell den Anfang der Integration digitaler Medien in den Unterricht darstellt. Die Konzeption von AR-Experimenten hingegen sieht eine Erweiterung klassischer Experimente durch Visualisierungen vor, die in Modellen verankerte wissenschaftliche Prinzipien und Zusammenhänge vermitteln. Mit AR-Experimenten kann Lernenden der Unterschied zwischen Phänomen und Modell eindrücklich vermittelt werden, was der ersten Schritt in Richtung eines angemessenen Naturwissenschaftsverständnisses (NoS) ist (Akerson, Buck, Donnelly, Nargund-Joshi & Weiland, 2011, S. 549; Lederman, 2007). Es darf jedoch kein Zweifel aufkommen, dass die virtuellen Objekte künstlich in die Umgebung hinzugefügt und nicht durch die Technik auf wundersame Weise sichtbar gemacht werden. Werden Teilchenbewegungen oder andere mikroskopische Vorgänge modelliert und in AR betrachtet, könnte dieser Eindruck schnell entstehen.

Im Folgenden wird als Beispiel eines AR-Experiments das bereits angesprochene Phänomen des Spiegelbildes am ebenen Spiegel vertieft (siehe Kapitel 3.1.4). Im zugehörigen dynamischen Modell werden reflektierte Lichtwege geradlinig hinter den Spiegel verlängert, die sich in einem Punkt schneiden. Es wird argumentiert, dass sich das Spiegelbild für alle Beobachtenden an dieser Stelle befindet. Werden in dem dynamischen Modell andere Positionen der realen Lichtquelle eingestellt und mit dem Schnittpunkt verglichen, kann eine Hypothese

3 Physikalische Modellbildung

für die Position des Spiegelbildes abgeleitet werden: Es liegt hinter dem Spiegel und hat denselben Abstand zum Spiegel wie der Gegenstand. Die Anwendung des physikalischen Prinzips der geradlinigen Lichtausbreitung in Kombination mit dem Reflexionsgesetz und der Annahme, dass das Auge als Empfänger keine Richtungsänderungen des Lichts wahrnehmen kann, führt zu einer Aussage, deren Wahrheitsgehalt im Experiment überprüft werden kann. Das kann z. B. mit einer Münze, einer Glasplatte und Abstandsmarkierungen auf einem Blatt Papier geschehen. Um dieser Argumentation folgen zu können, müssen Lernende (nachdem sie das Phänomen *Spiegelbild* für sich entdeckt haben) einen lückenlosen, kognitiven Prozess vom Modell zur Hypothese und dann zum Experiment absolvieren. Damit vollziehen sie im Sinne der physikalischen Modellbildung mehrere Ebenwechsel (siehe These 1 in Kapitel 3.1.1 und These 2 in Kapitel 3.1.2). Sie müssen eine Unterscheidung zwischen realen Beobachtungen und mentalen Konstrukten vornehmen, um den Prozess naturwissenschaftlicher Erkenntnisgewinnung nachvollziehen zu können (siehe These 3 in Kapitel 3.1.2). Der kognitive Prozess der Lernenden wird mithilfe von AR dadurch erleichtert, dass der Übergang zwischen Hypothese und Experiment visuell unterstützt wird. Die Lernenden können die im Modell enthaltenen Schlussfolgerungen (virtuelle Inhalte) und experimentelle Beobachtungen (reale Inhalte) im Zusammenhang rezipieren (siehe Tabelle 4). Das wird durch virtuelle Objekte erreicht, um die das Experiment mit seinen realen Objekten an den richtigen Stellen erweitert wird. In dem Beispiel werden die reflektierten und hinter den Spiegel verlängerten Lichtwege des Modells direkt in die reale Situation eingeblendet. Sobald der Punkt, der den Ort eines Gegenstandes markiert, auf einen realen Gegenstand vor dem Spiegel geschoben wird, deutet die Kreuzung der verlängerten Lichtwege den Ort des mit den Augen wahrgenommenen Spiegelbildes an (siehe Abbildung 17, entnommen aus Teichrew & Erb, 2022).

Die Durchführung eines AR-Experiments mit *GeoGebra* beinhaltet die in Tabelle 5 aufgelisteten Phasen. Die Erläuterungen skizzieren den idealtypischen Verlauf des Experiments aus dem Beispiel. Bei auf speziellen Markern basierten

Tabelle 4: Objekte und Inhalte zum Spiegelbild am ebenen Spiegel

| | Objekte | Inhalte |
|----------|-------------------|---------------------------------|
| real | Spiegel und Münze | Ort des Spiegelbildes |
| virtuell | Lichtwege | Kreuzung verlängerter Lichtwege |

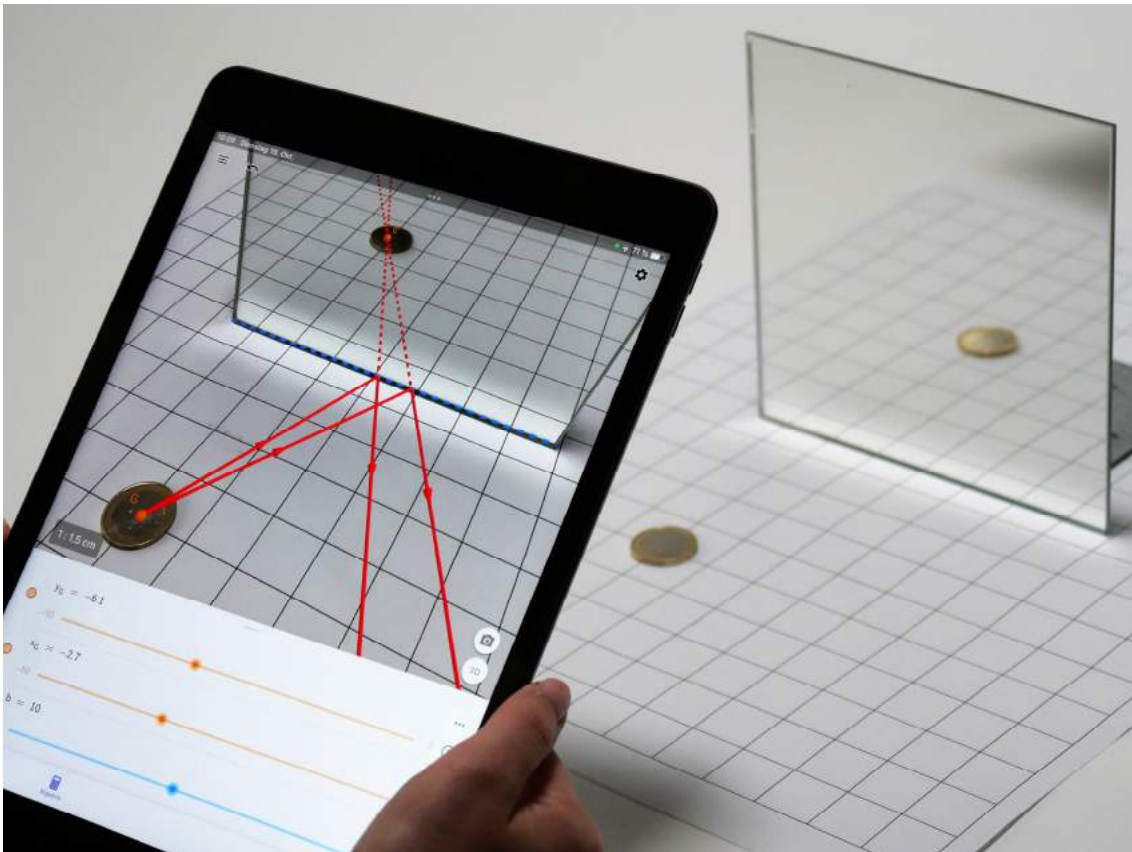


Abbildung 17: AR-Experiment zum Spiegelbild am ebenen Spiegel

AR-Apps (mit Triggerobjekten) entfällt die Phase 4, was dazu führt, dass sich die virtuellen Objekte automatisch an einer vordefinierten Stelle im Raum befinden (vgl. Stinken-Rösner, 2019). Das erleichtert zwar die Bedienung, gleichzeitig entfällt jedoch oft die Notwendigkeit oder gar die Möglichkeit, mit den virtuellen Objekten zu interagieren und ihre Position oder Form zu verändern. Der Prozess der Anpassung des Modells an die Realität, mit dem Ziel die Prognosen des Modells zu überprüfen, ist allerdings ein wichtiger Schritt in der naturwissenschaftlichen Erkenntnisgewinnung, der in diesem Lernszenario exemplarisch verdeutlicht werden kann.

Anhand dieses Beispiels lassen sich weitere AR-Experimente für verschiedene Themenbereiche der Physik ableiten, die auf der physikalischen Modellbildung basieren. Während in der geometrischen Optik neben der Reflexion auch die Lichtwege bei der Brechung (Teichrew & Erb, 2020c) und bei optischen Abbildungen visualisiert werden (Erb & Teichrew, 2020), sind es in der Newtonschen Mechanik Massepunkte und Kraftpfeile (Weber & Teichrew, 2021). In der Elektrizitätslehre bietet es sich an, Potenziale über Stromkreise (Teichrew & Erb,

3 Physikalische Modellbildung

2020d) oder Potenziale und Felder im Raum einzublenden (Teichrew et al., 2019). In der Wellenphysik kann die Ausbreitung von ebenen und kreisförmigen Wellen modelliert werden, wobei die vorhergesagten Intensitätsverteilungen in Experimenten mit Mikrowellen überprüft werden (Teichrew & Grasse, 2021).

3.2 Lernen mit Modellen und Experimenten²²

Im Folgenden werden die theoretischen Überlegungen zur physikalischen Modellbildung anhand des Kreislaufs der Erkenntnisgewinnung aus einer unterrichtspraktischen Sicht betrachtet (siehe Kapitel 3.2.1). Die Orientierung des Unterrichts an Modellen und Experimenten erlaubt den Ausbau von Experimentier- und Modellkompetenzen (siehe These 2 in Kapitel 3.1.2) in einem gemeinsamen Erkenntnisprozess (siehe Kapitel 3.2.2), was anhand eines Beispiels zum Regenbogen ausführlich besprochen wird (siehe Kapitel 3.2.3).

Tabelle 5: Phasen und Aktivitäten während eines AR-Experiments mit *GeoGebra*

| Nr. Phase | Aktivität | Beispiel zum Spiegelbild |
|--------------------------------|-----------------------|--|
| 1 Arbeit mit dem Modell | Hypothese formulieren | Das Spiegelbild liegt hinter dem Spiegel und hat denselben Abstand zum Spiegel wie der Gegenstand. |
| 2 Durchführung des Experiments | Am Modell orientieren | Eine Münze wird auf eine karierte Unterlage vor den Spiegel gelegt. |
| 3 Erweiterung des Experiments | Modell einblenden | Die Unterlage wird im AR-Modus der App erkannt. |
| 4 Überlagerung des Experiments | Modell ausrichten | Die virtuelle Spiegelachse wird über die reale geschoben und an ihr ausgerichtet. Der Punkt, der den Ort des Gegenstandes markiert, wird an die reale Münze angepasst. |
| 5 Vergleich der Ergebnisse | Modell überprüfen | Der durch die Kreuzung der verlängerten Lichtwege vorhergesagte Ort des Spiegelbildes stimmt mit dem realen überein. |
| 6 Reflexion des Modells | Grenzen erkennen | Das Modell enthält nur die auf der Tischfläche verlaufenden Lichtwege, während in der Realität der gesamte Spiegel das Licht der Münze reflektiert. |

²² Dieses Kapitel enthält Abschnitte, die der Argumentation bereits publizierter Beiträge folgen (vgl. Teichrew & Erb, 2020e).

3.2.1 Unterrichtsplanung

Als Hilfestellung bei der Gestaltung von Lernumgebungen mit Modellen und Experimenten ist in Tabelle 32 ein Planungsraster für Lehrende dargestellt. Die in den einzelnen Feldern formulierten Leitfragen sollen das Ausfüllen des Rasters mit themenabhängigen Inhalten erleichtern. Der Ausgangspunkt der Überlegungen ist ein Phänomen, das zunächst rein phänomenologisch – also auf unvoreingenommenen Beobachtungen basierend – beschrieben wird. Die weiteren Schritte werden sinngemäß durch die Fragestellung eingeleitet: Warum ereignet sich das Phänomen so und nicht anders? Das Entwickeln einer Fragestellung ist genauso wie das Aufstellen von Hypothesen ein wichtiger Teil der Planung eines Experiments. Allerdings benötigen Lernende für begründete Vorhersagen zunächst eine Grundlage. Im Vorfeld eines hypothesenüberprüfenden Experiments wird deshalb mithilfe von Visualisierungen ein mentales Modell mit möglichen Zusammenhängen gewisser Größen aufgebaut, das im nächsten Schritt mit konkreten Werten zu einer Hypothese präzisiert wird. Nach dem durchgeführten Experiment lässt sich die für das Verständnis der Erkenntnisgewinnung mit Modellen und Experimenten wichtige Reflexion der einzelnen Lernprodukte mit entsprechenden Leitfragen gestalten (siehe These 3 in Kapitel 3.1.2).

3.2.2 Kompetenzen

Die am Anfang des Kapitels erläuterten Schritte naturwissenschaftlicher Untersuchungen (SI), die sich um die Planung, Durchführung und Auswertung eines Experiments konzentrieren, haben bei entsprechender Unterrichtsgestaltung eine Förderung von Experimentierkompetenzen zur Folge. Für ein angemessenes Verständnis der Natur der Naturwissenschaften (NoS) ist eine Erweiterung dieser Schritte um eine Modellkomponente im Unterricht notwendig. Bei der Arbeit mit Visualisierungen und Simulationen werden naturwissenschaftliche Kenntnisse zum Phänomen vermittelt, die zum Aufbau eines adäquaten mentalen Modells führen sollen. Außerdem können unterschiedliche Modelle zur Beschreibung eines Phänomens diskutiert werden. Dabei wird der Einsatz von Modellen zur Ableitung von Hypothesen unterstrichen, die nach ihrer Überprüfung im Experiment eine Einschätzung des Modells erlauben, was die Förderung von Experimentier- und Modellkompetenzen in einem gemeinsamen Erkenntnisprozess ermöglicht (siehe Tabelle 6). Die gestrichelten Pfeile in Tabelle 6 zeigen die Reihenfolge im Kreislauf auf, in der bestimmte Kompetenzen während der Erkenntnisgewinnung gefordert und gefördert werden. Die Kompetenzen teilen sich

3 Physikalische Modellbildung

dabei gemäß den Eigenschaften der Lernaktivitäten zum einen in fachbezogene zum anderen in methodische Experimentier- und Modellkompetenzen auf:

- Fachbezogene Experimentierkompetenzen befähigen zur Zuordnung einer situativen Beobachtung zu einem Phänomen, das auf fachlichen Konzepten basierend mit entsprechenden Modellen innerhalb ihrer Grenzen erklärt werden kann.
- Fachbezogene Modellkompetenzen befähigen zur adressatengerechten Darstellung der Bestandteile und Zusammenhänge eines abstrakten Modells, mit dem ein bestimmtes Phänomen beschrieben werden kann.
- Methodische Modellkompetenzen befähigen zur Ableitung von überprüfbaren Hypothesen aus Modellen, indem Vorannahmen getroffen und situative Umstände berücksichtigt werden, auf deren Basis – je nach Ausgang des Experiments – eine differenzierte Einschätzung des Modells vorgenommen werden kann.
- Methodische Experimentierkompetenzen befähigen zum Aufbau und zur Durchführung von Experimenten, mit denen aus Modellen abgeleitete Hypothesen überprüft werden können.

3.2.3 Beispiel zum Regenbogen

Der Regenbogen ist den Lernenden einerseits als eindrucksvolles Naturphänomen aus dem Alltag bekannt. Andererseits bietet die Diskussion über seine Entstehung eine Gelegenheit, sich mit der Ausbreitung des Lichts in verschiedenen

Tabelle 6: Beim Lernen mit Modellen und Experimenten geforderte und geförderte Experimentier- und Modellkompetenzen

| | Experimentierkompetenzen | | Modellkompetenzen |
|-------------|--|---|--|
| fachbezogen | 1. Aus einer Beobachtung ein Phänomen identifizieren | → | 2. Für ein Phänomen ein Modell konstruieren |
| | 8. Mit einem Phänomen eine Beobachtung erklären | ← | 7. Mit einem Modell ein Phänomen beschreiben |
| methodisch | 5. Mit einem Experiment eine Hypothese überprüfen | → | 6. Nach einem Experiment ein Modell beurteilen |
| | 4. Hypothesengeleitet ein Experiment durchführen | ← | 3. Aus einem Modell eine Hypothese formulieren |

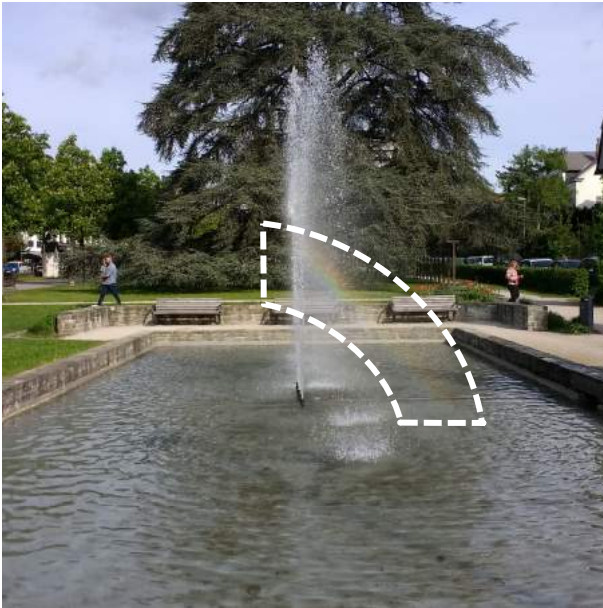


Abbildung 18: Aufnahme eines Regenbogens an einem Springbrunnen

Medien auseinanderzusetzen (vgl. Erb, 2008; Vollmer, 2019). Im Folgenden werden die vorherigen theoretischen Überlegungen und unterrichtspraktischen Hinweise in einem Beispiel zum Regenbogen umgesetzt.

Von der Beobachtung zum Phänomen

Der Regenbogen ist eine auffällige Leuchterscheinung am Himmel. Darüber hinaus ist er kein einmaliges Erlebnis, sondern tritt unter bestimmten Umständen regelmäßig auf. Dadurch besteht ein begründetes Interesse herauszufinden, welche Umstände das sind und wodurch die Beobachtung eines Regenbogens möglich wird. Auf der phänomenologischen Ebene lässt sich festhalten, dass sich die Sonne dabei stets im Rücken befindet und der Blick in Richtung eines Regenschauers gerichtet ist. Blickt man mit dem Rücken zur Sonne in Richtung eines Springbrunnes, dann lässt sich ebenso ein Regenbogen beobachten, und zwar genau da, wo sich Wassertropfen in der Luft befinden (siehe Abbildung 18). Anscheinend sind die Regen- und Wassertropfen in der Lage, das Licht der Sonne in eine bestimmte Richtung zu reflektieren, wobei die Richtung für verschiedene Farben etwas variiert. Es bleibt die Frage, warum in einem bestimmten Winkelbereich mehr Licht beobachtet wird als in anderen Richtungen. Oder in einfacheren Worten: Warum sehen wir einen Regenbogen dort, wo wir ihn sehen?

Somit lassen sich Phänomene auf der Basis von Alltagsbeobachtungen oder qualitativen Demonstrationen im Unterricht durch Loslösung von der konkreten Situation *verallgemeinern*. Obwohl direkte Wahrnehmung vorzuziehen ist, kann

3 Physikalische Modellbildung

es objektive Hinderungsgründe dafür geben. In diesem Fall können *Dokumentationen* von bereits erfolgten Vorgängen in Form von Fotos oder Videos als Hilfsmittel herangezogen werden, um Fragestellungen bezüglich interessanter Phänomene abzuleiten.

Vom Phänomen zum Modell

Um die Fragestellung zu beantworten, warum sich ein Phänomen auf die eine oder andere Weise ereignet, werden mentale Modelle benötigt, die naturwissenschaftliche Ideen und nicht nur phänomenologische Beschreibungen beinhalten. Da Phänomene allerdings nicht in ihrer Gänze erfasst und in ein Modell übertragen werden können, werden bei ihrer gedanklichen und realen Konstruktion zwangsweise Idealisierungen am modellierten Phänomen vorgenommen. Dazu gehört unter anderem, dass bestimmte Aspekte fokussiert und andere bewusst weggelassen werden (vgl. Winkelmann, 2019). Außerdem wird zu ihrer Konstruktion ein theoretischer Rahmen benötigt, in dem relevante Fachbegriffe eingeführt wurden und gewisse Gesetze gelten.

Im Falle des Regenbogens *abstrahieren* wir zunächst von der Erscheinung und greifen auf Ideen der geometrischen Optik zurück. Es bietet sich an, mithilfe der DGS *GeoGebra* den Weg des Lichts durch eine Kugel dynamisch zu modellieren, das in einem bestimmten Abstand zur optischen Achse in einen sphärischen Körper einfällt (Teichrew, 2020).²³ Eine Reihe von Modellobjekten in Form von solchen mit *GeoGebra* erstellten dynamischen Modellen wurden als *Visualisierungen* für Phänomene der Optik zusammengetragen (vgl. Erb, 2017; Erb & Teichrew, 2020). Wird der obere Teil einer Kugel mit parallelem Licht bestrahlt, tritt das Licht teilweise im unteren Teil in Rückrichtung wieder aus (siehe Abbildung 19). Dabei wird es beim Eintritt nach dem Brechungsgesetz gebrochen, nach dem Reflexionsgesetz auf der Rückseite reflektiert und beim Austritt an der Vorderseite wieder gebrochen. Da der Brechungsindex optischer Medien mit der

²³ Das *GeoGebra*-Buch mit den in diesem Kapitel behandelten Modellen kann mithilfe des folgenden QR-Codes aufgerufen werden:



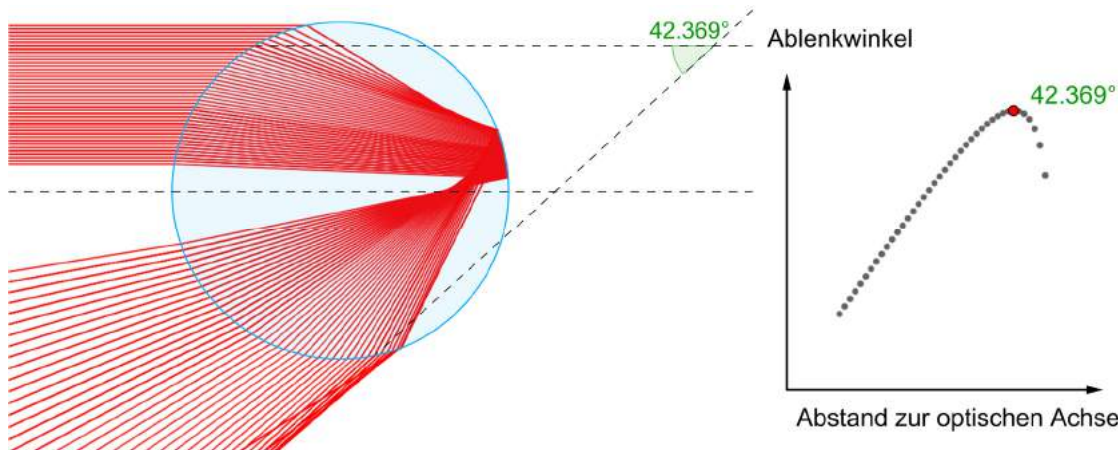


Abbildung 19: Dynamisches Modell zur Visualisierung der Brechung und Reflexion in einer Kugel

Wellenlänge variiert, weichen die Winkel beim Ein- und Austritt für einzelne Farben leicht voneinander ab. Entscheidend für die Entstehung des Regenbogens ist allerdings ein anderer Umstand: Die sphärische Form des lichtbrechenden Mediums führt dazu, dass bei gleichmäßiger Bestrahlung der Kugel mit parallel einfallendem Licht einer Wellenlänge der Austritt nicht mehr parallel verläuft. Der Ablenkwinkel wächst mit zunehmendem Abstand zur optischen Achse, erreicht ein Maximum und nimmt danach wieder ab. Als Folge wird Licht in der Nähe des Maximums zwei Mal in dieselbe Richtung reflektiert. In Abbildung 19 lässt sich die resultierende Aufhellung an den dicht beieinanderliegenden Linien beim Austritt erkennen. Um einem naiven Naturwissenschaftsverständnis vorzubeugen, gilt es an dieser Stelle, die Grenzen und die Vorläufigkeit von Modellen im Unterricht zu thematisieren. Beim Beispiel des Regenbogens wird davon ausgegangen, dass das Licht der Sonne in Form von parallelen Lichtstrahlen auf Regentropfen in Form von Kugeln trifft. Außerdem werden die Abschwächung der Intensität der modellierten Strahlen bei Brechung und Reflexion, der Austritt des Lichts auf der Rückseite sowie Mehrfachreflexionen außer Acht gelassen. Ob diese Einschränkungen einen Einfluss auf die Angemessenheit des Modells haben, bleibt zunächst offen und wird sich im weiteren Unterrichtsverlauf zeigen.

Vom Modell zur Hypothese

Das erläuterte dynamische Modell visualisiert allgemeine Zusammenhänge, die – abhängig von den jeweiligen Eingaben – situative Ergebnisse liefern. Sobald konkrete Eingaben vorgenommen werden, um eine bestimmte Situation zu modellieren, lässt sich auch von einer *Simulation* sprechen. Für rotes Licht sagt das Modell in Abbildung 19 eine höhere Lichtintensität bei einem Ablenkwinkel von

3 Physikalische Modellbildung

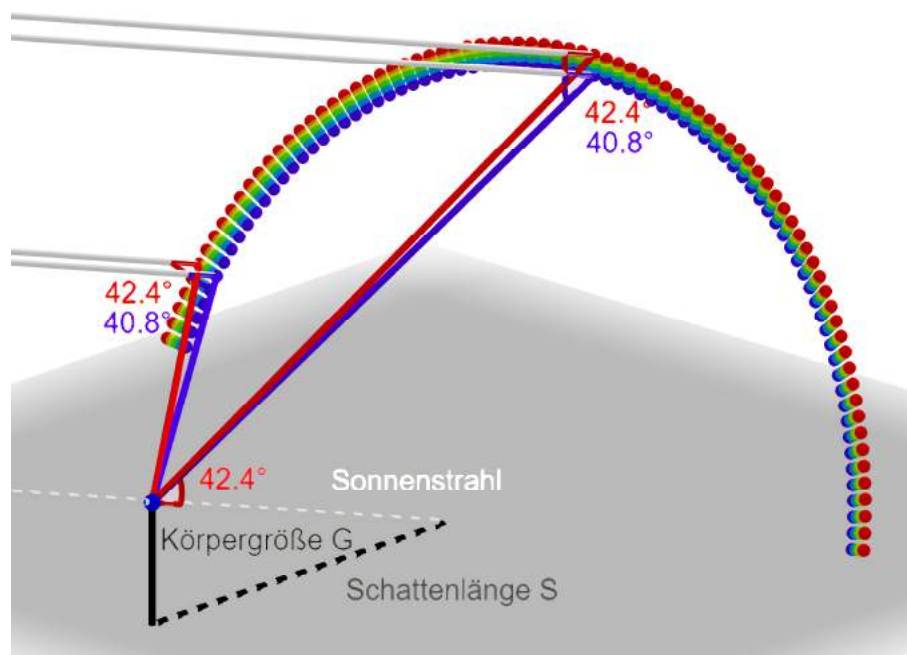


Abbildung 20: Dynamisches Modell zur Simulation der scheinbaren Lage eines Regenbogens

etwa $42,4^\circ$ voraus. Wird von einem parallelen Lichteinfall auf die Erde ausgegangen, lässt sich mithilfe der Gleichheit von Wechselwinkeln für die Lage des Regenbogens folgende Hypothese *konkretisieren*: Peilt man als Beobachter den höchsten Punkt des roten Bogens und das Ende des eigenen Schattens an, dann wird zwischen den beiden Richtungen ein Winkel von $42,4^\circ$ aufgespannt (siehe Abbildung 20).²⁴ Allerdings ist der Brechungsindex von Wasser unter anderem von der Temperatur und vor allem von der Wellenlänge des Lichts abhängig. In guter Näherung variiert der Brechungsindex von 1,331 für rotes Licht bis 1,342 für violettes Licht. Für verschiedene Farben des Lichts ergeben sich damit Ablenkungswinkel mit maximaler Intensität zwischen $42,4^\circ$ und $40,8^\circ$. Diese Behauptung lässt sich im Folgenden experimentell überprüfen.

Von der Hypothese zum Experiment

Eine Hypothese enthält klare Vorgaben an die Umstände, in denen ein Phänomen beobachtet werden müsste. Was bleibt, ist diese Vorgaben in einem experimentellen Aufbau zu *evaluieren*. Je nach Experiment werden unterschiedliche

²⁴ In vielen Fällen kann ein dynamisches Modell sowohl die Rolle der Visualisierung als auch der Simulation einnehmen. In diesem Fall wurden zwei Modelle zum Regenbogen einmal als Visualisierung des Lichtwegs durch eine Kugel und einmal als Simulation des gesamten Regenbogens erstellt.

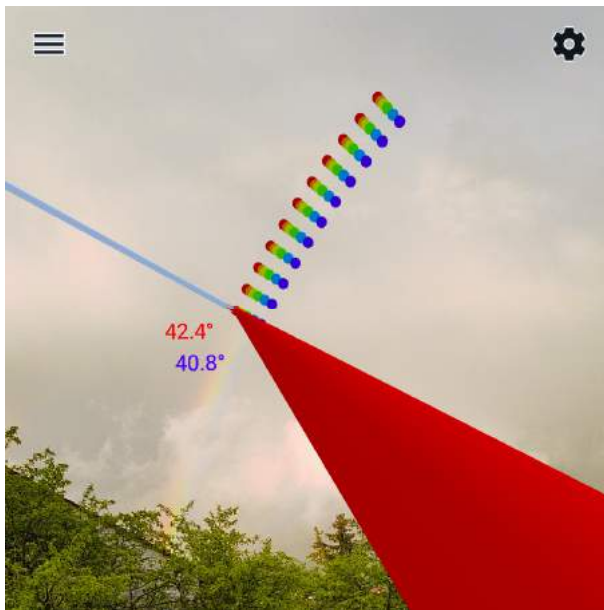


Abbildung 21: AR-Experiment zum Regenbogen

Messgeräte als Hilfsmittel der *Messwerterfassung* benötigt. Sie basieren ihrerseits auf theoretischen Vorüberlegungen, aber haben sich in der Praxis bereits bewährt, sodass ein Ablesen einer analogen oder digitalen Skala als reale Beobachtung wahrgenommen wird: Ausgestattet mit einem pendelbasierten Höhenwinkelmesser lässt sich bei der nächsten Beobachtung eines Regenbogens der Winkel zwischen dem Ende des eigenen Schattens und dem höchsten Punkt des Regenbogens bestimmen.

Hypothesen lassen sich aber auch mithilfe von AR-Experimenten überprüfen (siehe Kapitel 3.1.5). Mithilfe der App *GeoGebra 3D Rechner* werden reale Beobachtungen mit idealisierten Modelldarstellungen erweitert, die sich an die realen Gegebenheiten anpassen lassen. Im Falle des Regenbogens wird das Modell in Abbildung 20 mithilfe der AR-Funktion auf den Boden über das Kamerabild gelegt. Nach der Einstellung der Körpergröße G und Ausrichtung des Modells entlang des eigenen Schattens lässt sich der Weg des Lichts nachverfolgen, das von den verschiedenen Farben des Regenbogens kommt (siehe Abbildung 21). Die Punkte und Strecken im Modell deuten die Richtungen an, aus denen das Licht des Regenbogens in der entsprechenden Farbe ins Auge gelangt. Der genaue Abstand einer Regenwand ist für die Beobachtung in der Egoperspektive unerheblich und wird deshalb näher eingestellt als in Wirklichkeit.

Beim Lernen mit Modellen und Experimenten liegt das Ziel eines Experiments im Allgemeinen und eines AR-Experiments im Speziellen im direkten Vergleich der mentalen Ebene in Form von Modellhypothesen mit der realen Ebene in Form

3 Physikalische Modellbildung

von Beobachtungen während eines Experiments. Die Überprüfung der Hypothesen gehört zur schrittweisen Reflektion der erarbeiteten Lernprodukte, die zum Erkenntnisgewinn führt.

Vom Experiment zur Erkenntnis

Wie in der Mitte des Kreislaufs in Abbildung 12 in Kapitel 3.1 angedeutet, werden die Lernschritte nach dem hypothesengeleiteten Experiment in umgekehrter Reihenfolge noch einmal durchlaufen. Lernende reflektieren zum einen die einzelnen Lernprodukte und zum anderen den gesamten Erkenntnisprozess.

Zunächst werden die in den Hypothesen verankerten Idealisierungen und Grenzen in Anbetracht der Realität neu bewertet. Abweichungen zwischen dem Modell und dem Experiment werden akzeptiert, solange das Modell seinen Zweck erfüllt, den Ort des Hauptregenbogens mithilfe der Brechung und Reflexion im idealisierten Wassertropfen ungefähr vorauszusagen. Nachdem einzelne Hypothesen des Modells mit experimentellen Ergebnissen verglichen wurden, wird das Modell als Ganzes überdacht. Im Realexperiment werden beispielsweise Nebeneffekte sichtbar, die im Modell nicht berücksichtigt wurden, wie in diesem Beispiel der Nebenregenbogen. Das kann als Ausgangspunkt für eine erneute Iteration des Kreislaufs dienen, die zu anderen mentalen Modellen und Modellobjekten führt. In diesem Prozess wird exemplarisch deutlich, dass alternative Modelle ihre Berechtigung haben, denn sie verfolgen unterschiedliche Zielsetzungen. Die Erkenntnisse aus dem mentalen Modell, sofern sie durch ein Experiment gestützt wurden, dürfen innerhalb der diskutierten Grenzen auf das reale Phänomen übertragen werden. Die anfangs formulierte Fragestellung wird beantwortet und das Phänomen bekommt eine tiefergehende Beschreibung: Die Lage des Regenbogens hängt vom Sonnenstand relativ zum Beobachter ab und ist charakteristisch für die Brechung und Reflexion in einem sphärischen Körper. Schließlich können in Zukunft mithilfe des erarbeiteten Fachwissens ähnliche Beobachtungen und Experimente zumindest ansatzweise erklärt werden.

4 Dynamische Modelle im Praktikum der Optik

Das Praktikum für Bachelor- oder Lehramtsstudierende in naturwissenschaftlichen Fächern dient in erster Linie dem Ausbau von praktischen Fähigkeiten und Fertigkeiten, die zur methodisch angemessenen Durchführung von wissenschaftlichen Experimenten benötigt werden. Dazu zählen sowohl das allgemeine Verhalten im Labor und der Umgang mit Geräten als auch die Auswertung und Protokollierung der Messergebnisse. Solche Praktikumsveranstaltungen sind in der Regel an bestimmte theoretische Vorlesungen geknüpft. Das Praktikum dient in diesem Zusammenhang auch der eigenständigen Auseinandersetzung und Vertiefung der im Vorfeld theoretisch behandelten Sachverhalte.

Klassischerweise sind Praktika so organisiert, dass Themen und Experimente vorgegeben sind, auf die sich Studierende vor dem jeweiligen Versuchstag mithilfe einer Versuchsbeschreibung vorbereiten. Den Hauptteil machen vorstrukturierte Experimentieranleitungen aus, die zu den gewünschten Messergebnissen führen sollen. Die Vorbereitung erfolgt in der Regel eigenständig, während die Experimente in Zweiergruppen durchgeführt werden. Der Experimentierprozess und auch das nachfolgende Interpretieren der gewonnenen Daten im Protokoll fallen trotz Anleitung höchst unterschiedlich aus. Ob die von den Betreuenden angedachten Ziele des Versuchstages – also Beobachtungen, Messergebnisse und Erkenntnisse – erreicht werden, hängt von der Gruppendynamik und individuellen Lernvoraussetzungen wie z. B. der Motivation als hinreichende Bedingung ab. Die notwendige Bedingung für ein sinnvolles Experimentieren im Praktikum stellt jedoch das Verständnis der theoretischen Grundlagen dar, welches über das Abarbeiten der Anleitung hinaus geht. Es ist üblich, dass Betreuende ein Gespräch mit der Zweiergruppe vor dem Versuch führen, um die wesentlichen theoretischen Aspekte abzufragen oder aufzufrischen (Kolloquium). Die bestehenden Kenntnisse aus der Vorlesung und die Qualität der Vorbereitung sind in einigen Fällen jedoch nicht ausreichend, um die Theorie mit den experimentellen Handlungen, Beobachtungen und Ergebnissen zu verknüpfen. Teilweise fehlen die Vorstellungen und Kenntnisse zu den relevanten naturwissenschaftlichen Konzepten, die im jeweiligen Experiment benötigt werden. Diese in der Lehr-Lernpraxis zu beobachtende Hürde lässt sich innerhalb des theoretisch hergeleiteten Spannungsfelds physikalischer Modellbildung erklären: Für das Be-

4 Dynamische Modelle im Praktikum der Optik

herrschen und Verstehen realer Prozesse in Form von Phänomenen oder Experimenten werden entsprechende mentale Konstrukte in Form von Modellen und Hypothesen benötigt (siehe These 1 in Kapitel 3.1.1). Solche Lücken in einem Kolloquium aufzufangen, welches auf gesprochene Wörter, Gesten und ggf. Freihandskizzen als Medien zurückgreift, ist keine leichte Aufgabe.

Aus diesem Grund wurde das Praktikum für Lehramtsstudierende als erstes Anwendungsgebiet für die physikalische Modellbildung mit dynamischen Modellen als prägende Leitidee ausgewählt: Studierende bereiten sich auf das Experimentieren während eines Versuchstages mithilfe von dynamischen Modellen in einer digitalen Lernumgebung vor. Die Modelle visualisieren für das Experiment benötigte physikalische Konzepte, um den Lernschritt des Abstrahierens zu erleichtern (siehe These 5 in Kapitel 3.1.4). Die Arbeit mit einem dynamischen Modell sollte außerdem den Lernschritt des Konkretisierens erleichtern, indem passende Hypothesen in Bezug auf das Experiment nach der Auseinandersetzung mit dem simulierten physikalischen System formuliert werden (siehe These 6 in Kapitel 3.1.4).

An diese theoretischen Vorüberlegungen knüpfen Forschungsfragen an, die im Rahmen der praktischen Umsetzung des Lernens mit Modellen und Experimenten untersucht werden (siehe Kapitel 4.1). Das Studiendesign prägen jedoch neben der Forschungsabsicht auch die Gegebenheiten des physikalischen Praktikums an der Goethe-Universität Frankfurt für Studierende des Lehramts an Haupt- und Realschulen (siehe Kapitel 4.2). Für die Beantwortung der Forschungsfragen innerhalb des gewählten Studiendesigns wurden entsprechende Methoden der Datenerhebung ausgewählt (siehe Kapitel 4.3). Die Auswertung führt zu einer Reihe von explorativen Ergebnissen (siehe Kapitel 4.4), die anschließend zusammengefasst und diskutiert werden, um daraus Gestaltungsempfehlungen für dynamische Modelle abzuleiten (siehe Kapitel 4.5).

4.1 Forschungsfragen

Der Einsatz von dynamischen Modellen im physikalischen Praktikum ist von der Erwartung geprägt, dass Studierende ihre Erfahrungen während des virtuellen Experimentierens mit dem dynamischen Modell auf das reale Experimentieren mit den bereitgestellten Materialien übertragen. Inwieweit sich die Theorie zur physikalischen Modellbildung mit dynamischen Modellen in einer praktischen Lernumgebung bewährt, wurde mit explorativen Forschungsfragen untersucht.

Der explorative Charakter der Studie ist durch den Wunsch motiviert, den spezifischen Umgang Lernender (in diesem Fall Studierender) mit dem digitalen Medium im Detail zu untersuchen. Im Zentrum stehen somit Fragestellungen bezüglich des Lernprozesses mit dynamischen Modellen und nicht bezüglich der generellen Lernwirksamkeit der geschaffenen Lernumgebung. Eine explanative Studie könnte zwar den statistisch abgesicherten Nachweis der Effektivität eines Unterrichtskonzepts im Vergleich zu einem *traditionellen* Unterricht oder einem bestimmten alternativen Zugang liefern.²⁵ Allerdings können sich solche Studien selten der Kritik entziehen, dass nicht abschließend geklärt ist, welcher der vielfältigen Faktoren den wesentlichen Einfluss auf den Lernerfolg gebracht hat. Infrage kommen solche Erklärungsansätze wie die neuartige Unterrichtssituation allgemein, die Auswahl und Abfolge der Themen, die besondere Gestaltung der Materialien, die Einführung eines bestimmten didaktischen Modells und viele mehr. Explorative Studien könnten in diesem Fall empirische Hinweise dafür liefern, welche lernrelevanten Prozesse und Verhaltensmuster innerhalb der neuartigen Unterrichtskonzeption vorkommen, um darauf aufbauend explanative Studien durchzuführen, die den Effekt spezifischer Faktoren nachweisen. Allerdings sind auch solche Ergebnisse eher als Hinweise zu verstehen. Der reale Unterricht kann immer noch fehlschlagen, wenn einige Einflussfaktoren der Untersuchung wegen der grundsätzlichen Fülle an Variablen im Lernprozess und ihrer komplexen Zusammenhänge nicht berücksichtigt werden (Fischer & Krabbe, 2020).

Die Absicht, den Lernprozess mit dynamischen Modellen genauer in den Blick zu nehmen, erfordert einen qualitativen Ansatz, der sich auch mit den Lernprodukten auseinandersetzt. Deshalb werden in erster Linie Forschungsfragen formuliert, die sich auf die Arbeit mit dynamischen Modellen an sich und die Formulierung von Hypothesen durch Lernende beziehen:

| | |
|-------------------|---|
| Forschungsfrage 1 | Wie lässt sich die Arbeit der Lernenden mit einem dynamischen Modell charakterisieren? |
| Forschungsfrage 2 | Inwieweit hängt die Formulierung von Hypothesen mit der Arbeit mit dynamischen Modellen zusammen? |

²⁵ Schubatzky (2020) identifiziert beispielsweise Muster im Anfangs-Elektrizitätslehreunterricht, die für einen Teil der 32 befragten Lehrkräfte gelten. Ein einheitlicher Unterricht, der über Ländergrenzen hinweg ähnlich praktiziert wird, kann dennoch nicht erwartet werden.

4 Dynamische Modelle im Praktikum der Optik

Um diese Fragen zu beantworten, muss die Arbeit mit einem dynamischen Modell genau erfasst, beschrieben und analysiert werden, um daraus charakteristische Merkmale und Verhaltensmuster identifizieren zu können. Dafür muss das Modell genügend Interaktionsmöglichkeiten besitzen und die Arbeitsphase möglichst offen gestaltet werden, sodass verschiedene Vorgehensweisen beobachtet werden können. Des Weiteren müssen auch die von den Studierenden gebildeten Hypothesen gesammelt und kategorisiert werden, um ihre Quantität und Qualität mit den im Vorfeld bestimmten Merkmalen der Arbeit mit dem dynamischen Modell in Verbindung zu bringen.

Der Einsatz von dynamischen Modellen im Praktikum geschieht in einer spezifischen Lehr-Lernsituation, sodass sich die Arbeit mit dem Modell auch auf die nachfolgenden Phasen auswirken könnte. Gleichzeitig hängt der Lernprozess von individuellen Lernvoraussetzungen und der Motivation der Lernenden ab. Deshalb werden zusätzliche Forschungsfragen formuliert, die sich auf die Experimentierphase und lernbezogene Merkmale der Lernenden beziehen.

| | |
|-------------------|--|
| Forschungsfrage 3 | Inwieweit hängt die Durchführung von Experimenten mit der Arbeit mit dynamischen Modellen und der Formulierung von Hypothesen zusammen? |
| Forschungsfrage 4 | Inwieweit hängt das Lernen mit Modellen und Experimenten mit solchen lernbezogenen Merkmalen wie Fachwissen und Selbstwirksamkeitserwartungen sowie der Motivation der Lernenden zusammen? |

Zur Beantwortung dieser Fragen müssen die Merkmale des Experimentierprozesses qualitativ erfasst und lernbezogene Merkmale sowie die Motivation der Studierenden erhoben werden, um sie mit den restlichen Daten in Verbindung bringen zu können. Letzteres lässt sich mithilfe von quantitativen Methoden realisieren. Die Studie erfordert somit einen Mixed-Methods-Ansatz (siehe Kapitel 4.3).

4.2 Studiendesign

Die Studie wurde in die üblichen Abläufe im Praktikum der Optik für Studierende des Haupt- und Realschullehramtes eingegliedert, um den Einsatz von dynamischen Modellen in einer möglichst authentischen Lehr-Lernsituation umzusetzen und zu untersuchen. Die Studierenden bereiten sich normalerweise zu Hause mit

einer schriftlichen Versuchsbeschreibung auf die Versuchsdurchführung sowie die für die Planung und Interpretation der Versuche relevanten Fachinhalte eigenständig vor. Am Versuchstag suchen sie die Praktikumsräume auf und führen die angedachten Experimente in Zweiergruppen durch. Außerdem sprechen sie über die in der Vorbereitung behandelten Fachinhalte mit einer Person, die den Versuch betreut. Um die Forschungsfragen zu beantworten, wurde eine digitale Lernumgebung eingerichtet, die die theoretische Auseinandersetzung mit den Fachinhalten mithilfe von dynamischen Modellen unterstützt und damit die bisherige Versuchsbeschreibung sowie das Vorgespräch ersetzt. Zur Sicherstellung der Erfassung der für die Studie relevanten Handlungen und Hypothesen wurde ein Teil der Arbeit mit der Lernumgebung am Versuchstag in einem separaten Raum durchgeführt. Die Versuchsdurchführung fand im Anschluss statt, wobei die Arbeitsbelastung mit den nicht umgestalteten Versuchen in der Summe vergleichbar war.

Obwohl die Studie im normalen Lehrbetrieb stattgefunden hat, handelt es sich nicht um eine *Feld-*, sondern um eine explorative *Laborstudie*, da eine neuartige Lernumgebung geschaffen und untersucht wurde. Hinzu kommt die forschungsbedingte Datenerfassung im Laufe des Versuchstages. Sie wurde aus ethischen und datenschutzrechtlichen Gründen transparent gestaltet. Die Studierenden wurden u. a. über die Forschungsabsicht sowie Art, Umfang und Schutz der erhobenen Daten informiert, bevor sie eine Einverständniserklärung zur freiwilligen Teilnahme an der Studie unterschreiben konnten. Es bestand auch die Möglichkeit, an der Datenerfassung nicht teilzunehmen und trotzdem die vorgesehenen Lernangebote zu nutzen, wovon allerdings keiner der betroffenen Studierenden Gebrauch machte.

Im Folgenden wird zunächst die digitale Lernumgebung und der Ablauf erläutert (siehe Kapitel 4.2.1), bevor der für die Studie relevante Lerninhalt vertieft wird (siehe Kapitel 4.2.2). Schließlich wird die für die Untersuchung herangezogene Stichprobe beschrieben (siehe Kapitel 4.2.3).

4.2.1 Lernumgebung

Als Untersuchungsgegenstand wurde der innerhalb des Praktikums der Optik bestehende Versuch zum Thema Brechung ausgewählt und im Sinne des im Kapitel 3.2 beschriebenen Lernens mit Modellen und Experimenten umgestaltet. Als Ergebnis entstand innerhalb der Moodle-Lernplattform der Goethe-Universität

4 Dynamische Modelle im Praktikum der Optik

Frankfurt der Kurs „Modellbildung mit GeoGebra“, der die folgenden Elemente beinhaltete:²⁶

- Informationen zum Forschungsvorhaben
- Fragebögen und Tests
- Vier Lektionen zur Vorbereitung
- Versuchsanleitung zur Durchführung
- Hinweise für das Protokoll

Nachdem sich die Studierenden mit der Beschreibung des Forschungsvorhabens und der Einverständniserklärung auseinandergesetzt haben, bearbeiteten sie zur Erhebung der individuellen Lernvoraussetzungen einen Fachwissenstest (siehe Kapitel 4.3.1) und füllten Fragebögen bezüglich ihrer Selbstwirksamkeitserwartungen aus (siehe Kapitel 4.3.2). Um den Studierenden den generellen Ablauf zu erläutern, erhielten sie zunächst einen methodischen Hinweis, in dem sie direkt angesprochen wurden:

Sie lernen ein allgemeines Phänomen kennen, um das es in der Lektion geht.

Sie arbeiten mit einem dynamischen Modell und konstruieren eine Modellvorstellung des jeweiligen Phänomens.

Sie wenden das Modell an, um daraus Hypothesen und physikalische Aussagen abzuleiten.

Sie überprüfen Ihre Hypothesen und Modellvorstellungen im Experiment (dieser Schritt wird Teil des Versuchstages sein). (Teichrew, 2022a, Titelseite)

Die meisten Studierenden verfügten vor der Teilnahme an der Studie erwartungsgemäß über wenig Erfahrung mit dynamischen Modellen in der Physik. Aus diesem Grund bearbeiteten sie die ersten drei Lektionen zum Fermatschen Prinzip

²⁶ Der Zugang zur Lernplattform ist eingeschränkt. Allerdings wurde im Nachhinein eine Kopie des Kurses in *GeoGebra* erstellt (siehe „Erstellung von Lernaktivitäten mit GeoGebra“ in Kapitel 2.4.2). Dort sind die Lerninhalte und Aufgabestellungen wiedergegeben worden (Teichrew, 2022a). Das *GeoGebra*-Buch kann mithilfe des folgenden QR-Codes aufgerufen werden:



als obligatorische Bestandteile der Versuchsvorbereitung, allerdings wurde diese Eingewöhnungsphase nicht dokumentiert und untersucht. Die Studierenden konnten somit vor dem Versuchstag erste Erfahrungen mit dynamischen Modellen sammeln und den Ablauf kennenlernen, bevor die für die Studie relevanten Prozesse erfasst wurden. Die Lektionen folgen einem festen Schema aus Phänomen, Modell und Hypothese. Tabelle 33 im Anhang gibt einen Überblick über die Inhalte aller Lektionen. Jede Lektion wird mit einem Foto einer Realsituation eingeleitet. Das behandelte Phänomen wird infolgedessen mithilfe von Aufnahmen eines einfachen Demonstrationsexperiments illustriert. Die Seite zum Phänomen endet jeweils mit einer Fragestellung, die mithilfe des dynamischen Modells auf der zweiten Seite beantwortet werden kann. Diese enthält den theoretischen Hintergrund zur Konstruktion des Modells sowie Beschreibungen der zur Verfügung stehenden Bedienungsmöglichkeiten wie das Verschieben eines freien Punktes oder das Betätigen eines Schiebereglers. Auf der letzten Seite werden die Studierenden aufgefordert, ihre Erkenntnisse in Form von Hypothesen als Freitext einzugeben.

Die Inhalte der vierten Lektion zum Brechungsgesetz sowie die Versuchsanleitung wurden den Studierenden erst an ihrem Versuchstag zugänglich gemacht. Die Datenerfassung fand in einem separaten Raum statt, sodass die Zweiergruppe ungestört die Vorbereitung an bereitgestellten Laptops abschließen konnte. Die Grundlage für die Auswertung der Arbeit mit einem dynamischen Modell stellten zunächst Videoaufnahmen zum Modell *Lichtweg durch eine Halbkreisscheibe* dar (siehe Abbildung 22; Teichrew, 2022, Brechungsgesetz, Modell 1). Im zweiten Durchgang der Studie wurde eine automatisierte Erfassung der Handlungen in diesem Modell umgesetzt, die auf den Erkenntnissen der zuvor analysierten Videos basiert (siehe Kapitel 4.3.3). Die Arbeit mit dem Modell wurde zeitlich nicht beschränkt und konnte somit in Eigentempo erfolgen. Da die Vorbereitung auf einen Versuch für gewöhnlich in Einzelarbeit erledigt wird, arbeiteten die Studierenden mit dem dynamischen Modell unabhängig voneinander und notierten ihre Hypothesen für sich (siehe Kapitel 4.3.4). Das zweite Modell dieser Lektion visualisiert den Sinus des Einfallswinkels und Brechungswinkels als Gegenkatheten am Einheitskreis. Die dynamische Veränderung der Brechungsindizes der zwei Medien sowie der gemessenen Strecken erlaubt die Ableitung des Brechungsgesetzes (ebd., Brechungsgesetz, Modell 2). Die Arbeit mit diesem Modell wurde jedoch im Rahmen der Studie nicht ausgewertet.

4 Dynamische Modelle im Praktikum der Optik

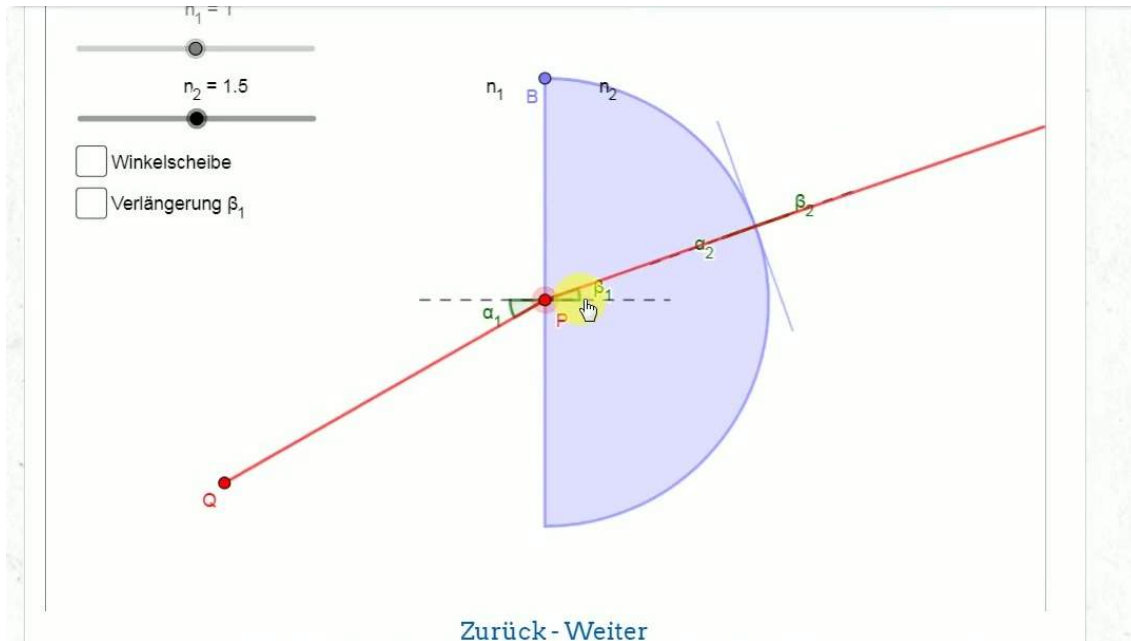


Abbildung 22: Ausschnitt aus einem Video zur Erfassung der Arbeit mit dem dynamischen Modell zum Lichtweg durch eine Halbkreisscheibe

Bevor das für den Versuchstag vorgesehene Experiment durchgeführt wurde, erfolgte zunächst eine Erhebung der intrinsischen Motivation während der Arbeit mit dem Modell (siehe Kapitel 4.3.5). Die in der Versuchsanleitung beschriebenen Experimente wurden direkt im Anschluss in Partnerarbeit durchgeführt. In der Versuchsanleitung werden den Studierenden zunächst die Ziele des experimentellen Teils des Versuchstages zum Brechungsgesetz erläutert:²⁷

Überprüfung der aufgestellten Hypothesen und des Brechungsgesetzes

Feststellung der Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen dem physikalischen Modell und dem realen Experiment

Ermittlung des Brechungsindex einer unbekanntes Flüssigkeit (Teichrew, 2022, Experiment zum Brechungsgesetz, Planung)

Die für das Experiment notwendigen Materialien wurden im selben Raum bereitgestellt, wo die Arbeit mit dem Modell stattfand. Die Handlungen auf dem Experimentiertisch wurden von oben mit einer Kamera so gefilmt, dass das Material und die Hände der Studierenden im Bild waren (siehe Abbildung 23). Die Perspektive der Aufnahmen entspricht der Perspektive der Modellansicht, um genaue Vergleiche zwischen der Arbeit mit dem Modell und dem Experimentieren

²⁷ Die genauen Beschreibungen der einzelnen Phasen und zugehörige Aufgabenstellungen werden im Methodenteil in Kapitel 4.3 wiedergegeben.

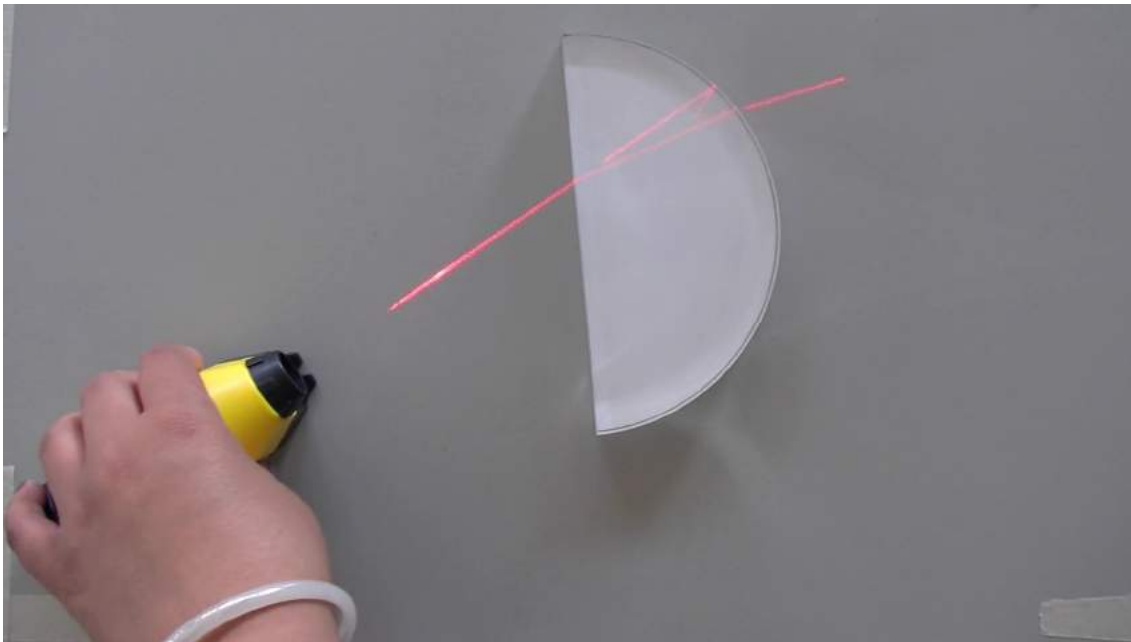


Abbildung 23: Ausschnitt aus einem Video zur Erfassung des Experiments nach der Arbeit mit dem Modell

ziehen zu können. Für die Studie waren der Umgang der Studierenden mit den Materialien bis zur Durchführung der Messreihe (siehe Kapitel 4.3.6) sowie die notierten Gemeinsamkeiten und Unterschiede von Interesse (siehe Kapitel 4.3.7). Die restlichen Teile des Versuchstages und die im Protokoll verschriftlichte Auswertung der Messergebnisse bauen zwar auf den vorherigen Phasen auf, sie haben jedoch nur einen indirekten Bezug zur Arbeit mit dem untersuchten Modell, sodass diese Vorgänge nicht mehr erfasst wurden.

4.2.2 Lerninhalt

Die ersten drei Lektionen basieren auf dem Fermatschen Prinzip, das anhand der Untersuchung der geometrischen Länge der Lichtwege bei der Lichtausbreitung und Lichtreflexion zunächst in seiner verkürzten Form eingeführt wird (Lichtweg mit der kürzesten Länge). Danach wird die optische Weglänge definiert und die Lichtbrechung mithilfe des vereinfachten Fermatschen Prinzips behandelt (Lichtweg mit der kürzesten Laufzeit). Die betrachteten geometrischen Konfigurationen und ihre Unterrichtseinbindung sind von Erb (1992) beschrieben worden. Entsprechende dynamische Konstruktionen mit der DGS *GeoGebra* wurden als Vorlage verwendet (Erb, 2017). Da die Arbeit mit diesen drei Modellen nicht

4 Dynamische Modelle im Praktikum der Optik

erfasst wurde, wird der physikalische Hintergrund und die Gestaltung der Modelle an dieser Stelle nicht weiter vertieft.²⁸

Der für die Studie relevante Lerninhalt betrifft die Lichtbrechung beim Ein- und Austritt des Lichts in und aus einem Körper. Ein schmales Lichtbündel einer Experimentierleuchte wird beim Eintritt gemäß dem Brechungsgesetz gebrochen. Es ändert somit seine Ausbreitungsrichtung und hinterlässt auf der Unterlage Streulicht, das in vielen Fällen unreflektiert als gebrochener Lichtstrahl oder Lichtweg interpretiert wird. Genau genommen verläuft das Licht nicht entlang der Lichtspur, sondern jeweils schräg von der Lichtquelle zum entsprechenden Punkt auf der Unterlage (vgl. Grusche, 2018b). Befindet sich die Lichtquelle oberhalb der Halbkreisscheibe – oder wird ein Linienlaser verwendet, der eine Lichtebene senkrecht zur Unterlage erzeugt – lässt sich neben dem zum Lot gebrochenen ein scheinbar geradlinig weiterlaufendes Lichtbündel beobachten, das zudem an der hinteren Grenzfläche reflektiert wird (siehe Abbildung 24). Dieser Nebeneffekt lenkt vom Phänomen der Brechung ab. Er entsteht durch das Licht, das nicht von der Seite durch die Halbkreisscheibe verläuft, sondern schräg von oben in sie eindringt. Dieses Licht wird ebenfalls gebrochen, aber nur nach unten zur Tischfläche hin. Anhand der Leuchtspur ist diese Richtungsänderung nicht zu erkennen. Zudem ist bei entsprechenden Lichtverhältnissen die Reflexion des Lichts an der vorderen Grenzfläche zu sehen. Solche Nebeneffekte werden im für den Versuch gestalteten Modell zum Lichtweg durch eine Halbkreisscheibe als eine Form der Idealisierung ausgeblendet (siehe Kapitel 2.2).

Den Studierenden wird mithilfe des Modells die Möglichkeit gegeben, den Verlauf des Lichts ausgehend von einer Lichtquelle durch einen Punkt auf der flachen Seite der Halbkreisscheibe zu verfolgen. Je größer der Abstand der Eintrittsstelle vom Mittelpunkt der Halbkreisscheibe ist, desto stärker macht sich die Brechung beim Austritt aus dem Körper bemerkbar. Durch das Ausprobieren verschiedener Eintrittsstellen wird deutlich, dass die geometrische Form der Halbkreisscheibe ausgenutzt werden kann, sodass die Brechung nur beim Eintritt erfolgt: Das Lichtbündel muss durch den Mittelpunkt geführt werden, um mit einer Winkelscheibe den Brechungswinkel beim Übergang von Luft zu dem verwendeten Medium zu messen. Gemessen wird üblicherweise mit einer Winkelscheibe vom Lot aus, sodass die Halbkreisscheibe nicht nur mittig, sondern auch so positioniert werden

²⁸ Die Behandlung des Fermatschen Prinzips mithilfe von dynamischen Modellen wird bei der Darstellung der Modelle aufgegriffen, die nach den Erkenntnissen dieser Studie neugestaltet und zu einem Unterrichtskonzept zusammengestellt wurden (siehe Kapitel 5.2.2).

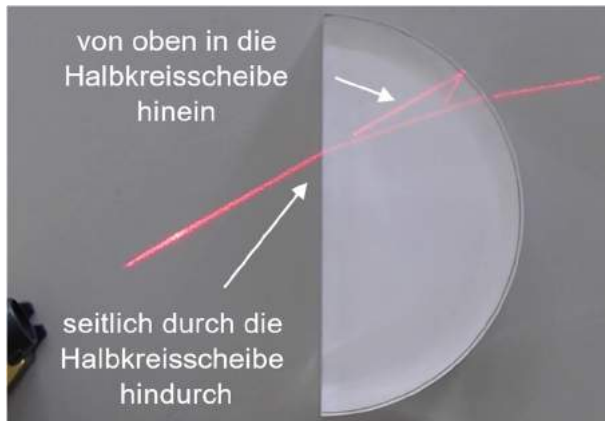


Abbildung 24: Experiment mit einem Linienlaser zum Lichtweg durch eine Halbkreisscheibe

muss, dass senkrecht zur untersuchten Grenzfläche 0° angezeigt wird. Für eine Messung muss somit die Mitte der Halbkreisscheibe über der Mitte der Winkelscheibe liegen und das Lichtbündel muss diesen Punkt bei jedem gewählten Einfallswinkel genau treffen. Die Arbeit mit dem dynamischen Modell zum Lichtweg durch eine Halbkreisscheibe dient somit dem Aufbau eines mentalen Modells zur Messung des Einfalls- und Brechungswinkels mit den in der Schule üblicherweise zur Verfügung stehenden Experimentiermaterialien. Allerdings können die Studierenden im Modell nicht nur die Eintrittsstelle variieren. Es besteht auch die Möglichkeit, den Brechungsindex und die Größe der Halbkreisscheibe sowie die Positionen der Lichtquelle und einer optional hinzuschaltbaren Winkelscheibe zu verändern (siehe Kapitel 4.3.3). Diese unterschiedlichen Interaktionsmöglichkeiten laden zu explorativen Handlungen ein, die in Anbetracht der Forschungsfrage 1 charakterisiert werden und zu vielfältigen Hypothesen nach der Arbeit mit dem Modell führen sollen (siehe Kapitel 4.1).

Die für die Studie relevanten Lernprodukte, -schritte und -medien innerhalb der physikalischen Modellbildung mit dynamischen Modellen sind dem Planungsraster in Tabelle 34 im Anhang zu entnehmen. Die folgenden Ausführungen fassen den Erkenntnisprozess zusammen. Sie stellen mit dem Planungsraster den Erwartungshorizont bezüglich der beobachteten Handlungen und niedergeschriebenen Aussagen der Studierenden im Verlauf des innerhalb der Studie analysierten Lernprozesses dar.

| | |
|----------|---|
| Phänomen | Zur Messung des Brechungswinkels beim Übergang von Luft in ein anderes Medium werden Halbkreisscheiben verwendet. Welche Vorteile hat diese spezielle Form und was ist bei der Messung zu beachten? Die Aufnahme eines breiten Lichtbündels ei- |
|----------|---|

4 Dynamische Modelle im Praktikum der Optik

| | |
|------------|---|
| | <p>ner Experimentierleuchte, das durch die Halbkreisscheibe hindurchgeht, demonstriert zunächst, dass das Licht im Allgemeinen sowohl beim Eintritt als auch beim Austritt gebrochen wird.</p> |
| Modell | <p>Der Lichtweg durch eine Halbkreisscheibe wird unter Anwendung des Brechungsgesetzes modelliert. Das Licht trifft ausgehend von einem Punkt Q in Luft ($n_1 = 1$) auf die flache Seite der Halbkreisscheibe. Sowohl die Position der Lichtquelle als auch die Eintrittsstelle P können variiert werden. Mithilfe einer optionalen Winkelscheibe lässt sich das reale Experiment im Modell nachstellen. Als abstrakte Elemente, die im realen Aufbau nicht enthalten sind, werden das Lot sowie Einfallswinkel und Brechungswinkel beim Ein- und Austritt in Abhängigkeit des Brechungsindex n_2 visualisiert. n_2 lässt sich mit einem Schieberegler zwischen 1 und 2 variieren.</p> |
| Hypothese | <p>Das Licht wird beim Eintritt zum Lot hin und beim Austritt vom Lot weg gebrochen. Zur Messung des Brechungswinkels beim Eintritt muss das Licht betrachtet werden, welches durch die Mitte der Halbkreisscheibe verläuft. Die Halbkreisscheibe muss zudem mittig auf einer Winkelscheibe positioniert werden, um eine genaue Messung durchführen zu können, die nicht durch eine Brechung beim Austritt verfälscht wird.</p> |
| Experiment | <p>Die Leuchtspur eines Linienlasers wird durch eine Halbkreisscheibe aus Acrylglas auf dem Tisch verfolgt.²⁹ Zur genauen Messung des Brechungswinkels müssen Laser, Halbkreis- und Winkelscheibe präzise ausgerichtet werden. Im realen Aufbau ist außerdem Licht zu erkennen, das nicht seitlich durch die Halbkreisscheibe verläuft, sondern von oben eindringt und eine scheinbar ungebrochene Leuchtspur hinterlässt.</p> |
| Reflexion | <p>Die Brechung beim Ein- und Austritt kann im Experiment mit der Halbkreisscheibe beobachtet werden. Die Form ist für eine genaue Messung des Brechungswinkels beim Eintritt geeignet. Im Modell fehlen jedoch (neben dem scheinbar ungebrochenen</p> |

²⁹ Im Kurs wurde der Handelsname Plexiglas verwendet, unter dem Acrylglas bekannt geworden ist. Er wird deshalb im Folgenden beibehalten.

Licht) auch das beim Eintritt reflektierte Licht sowie die unter bestimmten Winkeln zu beobachtende Totalreflexion beim Austritt. Wird der Verlauf eines divergenten Lichtbündels durch eine Halbkreisscheibe betrachtet, lässt sich letztendlich feststellen, dass das Licht wie bei einer Linse fokussiert wird.

4.2.3 Stichprobe

Empirische Untersuchungen in der Didaktik, der Lernpsychologie oder den Sozialwissenschaften haben das Ziel, Aussagen bezüglich einer bestimmten Grundgesamtheit zu generieren. Diese Grundgesamtheit ist jedoch nur in den seltensten Fällen so beschaffen, dass sie in endlicher Zeit und mit endlichen Mitteln vollständig untersucht werden kann. Es findet eine Zufallsauswahl statt, bei der jedes Element der Grundgesamtheit im besten Fall die gleichen Chancen hat, an der Untersuchung teilzunehmen. Dadurch werden die notwendigen Voraussetzungen für die angewandten statistischen Methoden erfüllt, mit denen die berichteten Ergebnisse in Bezug auf die Grundgesamtheit legitimiert werden (z. B. Signifikanzwerte und Effektstärken). Allerdings kommt aus forschungspraktischen Gründen oft eine Klumpenauswahl zum Einsatz, bei der sich die an der Untersuchung teilnehmenden Personen zeitlich und räumlich nah beieinander befinden (Häder & Häder, 2014, S. 286). Diese Teilpopulation, die als Klumpen bezeichnet wird, sollte nach Möglichkeit vollständig erhoben werden, um ein maximal heterogenes Bild innerhalb des Klumpens zu bekommen, während die einzelnen in Betracht kommenden Klumpen sich voneinander wenig unterscheiden dürfen (Stein, 2014, S. 148). Das heißt im Umkehrschluss, dass die Belastbarkeit generalisierter Aussagen, die z. B. mit Studierenden einer Hochschule erhoben werden, sehr stark davon abhängt, wie sehr sich diese Studierenden innerhalb der untersuchten Merkmale von den Studierenden anderer Jahrgänge und Standorte unterscheiden. Um die Qualität einer solchen Stichprobe zu erhöhen, sollte zudem die Anzahl der Klumpen erhöht werden.

An der Goethe-Universität Frankfurt absolvieren pro Jahrgang ungefähr 20 Personen das Praktikum der Optik für Studierende des Lehramts an Haupt- und Realschulen. Für die vorliegende Untersuchung konnten zwei Jahrgänge gewonnen

4 Dynamische Modelle im Praktikum der Optik

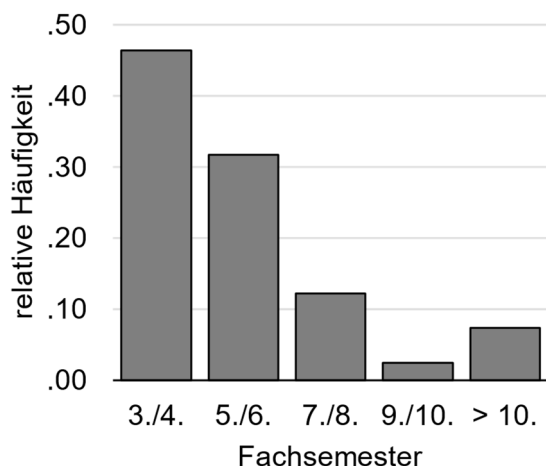


Abbildung 25: Häufigkeitsverteilung der Fachsemester der Studierenden

werden, sodass insgesamt $N = 41$ Studierende an allen Teilen der Studie teilnahmen.³⁰ Dieses Praktikum ist für das vierte Fachsemester vorgesehen, in dem sich auch fast 50 % der Stichprobe zum Zeitpunkt der Durchführung der Studie befand. Es gab allerdings auch Studierende aus höheren Fachsemestern (siehe Abbildung 25), darunter auch drei Langzeitstudierende, die teilweise seit deutlich mehr als zehn Fachsemestern studierten. Obwohl in Hessen Lehramtsstudierende zwischen beliebigen Fächerkombinationen wählen können, studierten in der Stichprobe 28 Personen (ca. 68 %) neben Physik auch das Fach Mathematik auf Lehramt, was allerdings nicht außergewöhnlich ist.

In Anbetracht der explorativen Fragestellungen der Studie, die unter anderem mit qualitativen Methoden beantwortet werden, erscheinen Umfang und Heterogenität der Stichprobe als ausreichend: In der Untersuchung geht es weniger um belastbare Aussagen bezüglich der Anteile eines mehr oder weniger erfolgreichen Umgangs mit dynamischen Modellen innerhalb der Grundgesamtheit der Studierenden. Es geht ebenso wenig darum, einzelne Fälle zu beleuchten. Das primäre Ziel ist, Strukturen, Prozesse und spezifische Verhaltensmuster aufzudecken, die bei der Arbeit mit einem dynamischen Modell auftreten, sie mit den formulierten Hypothesen und der Durchführung des Experiments in Verbindung zu bringen und ihr Zustandekommen in Abhängigkeit der lernbezogenen Merkmale zu untersuchen (siehe Forschungsfrage 1 bis Forschungsfrage 4 in Kapitel 4.1).

³⁰ Um Merkmale von bestimmten Personen anzugeben, wird eine eindeutige Identifikationsnummer (ID) von 1 bis 41 verwendet. Die IDs 1 bis 20 stehen dabei für Studierende, die im ersten Jahrgang an der Studie teilgenommen haben. Studierende des zweiten Jahrgangs haben die IDs 21 bis 41. Gruppen werden mit einer Kombination aus den IDs der Einzelpersonen bezeichnet.

4.3 Methoden

Empirische Untersuchungen, die das Verstehen von Bedeutungen in den Mittelpunkt stellen, sind auf Methoden der qualitativen Forschung angewiesen, die sich an den Forschungsgegenstand anpassen. Der Wunsch nach einer „vergleichenden Analyse von bedeutungshaltigem Material“, erfordert jedoch auch ein systematisches und datenreduzierendes Vorgehen, das zwischen qualitativer und quantitativer Forschung steht (Schreier, 2013, S. 256). Eine Inhaltsanalyse, bei der die Kategorisierung und anschließende Quantifizierung von qualitativen Daten vorgesehen ist, macht allerdings noch keine Mixed-Methods-Forschung aus. Der Mixed-Methods-Ansatz wird dann notwendig, wenn eine bestimmte methodologische Tradition der Datenerhebung, -aufbereitung und -analyse für den untersuchten Forschungsgegenstand nicht ausreichend ist. Seine Stärke wird dann deutlich, wenn sowohl quantitative (geschlossene) als auch qualitative (offene) Daten nach den geltenden Standards erhoben, integriert und gemeinsam interpretiert werden (Creswell, 2015, S. 2).

Die Untersuchung medial gestützter Lernprozesse, die einen spezifischen Umgang mit bereitgestellten Unterrichtsmaterialien durch Lernende voraussetzen, ist ein Forschungsgegenstand, der sich nicht mit quantitativen Methoden greifen lässt. Die Handlungen und ihnen zugeschriebene Bedeutungen müssen qualitativ erfasst und analysiert werden (siehe Forschungsfrage 1 bis Forschungsfrage 3 in Kapitel 4.1). Allerdings sind individuelle Lernprozesse allgemein – und das Lernen mit (neuen) digitalen Medien speziell – so komplex und vielschichtig, dass erfolgreiches und zielführendes Handeln von vielen Faktoren beeinflusst werden kann. Lund (2012) führt auf, dass die Verbindung verschiedener Methoden u. a. zu einem besseren Abbild des untersuchten Phänomens führt. Die Integration quantitativ erhobener Merkmale mit qualitativ erfassten Verhaltensweisen und Bedeutungen in einer explorativen Studie soll das Prozessverständnis erhöhen und Ansätze zur Theorieentwicklung über mögliche kausale Beziehungen liefern (siehe Forschungsfrage 4 in Kapitel 4.1).

Jeder Datentyp erfordert im Laufe der Datenaufbereitung und -auswertung einen spezifischen Umgang, der den geltenden Standards aber auch dem Forschungsgegenstand entspricht. In den folgenden Kapiteln werden die verwendeten Methoden für jede Datengrundlage im Einzelnen beschreiben und. In Tabelle 7 sind die verschiedenen Phasen in der chronologischen Reihenfolge aufgelistet, in denen Daten zur Beantwortung der Forschungsfragen erhoben wurden. Als Daten-

4 Dynamische Modelle im Praktikum der Optik

grundlagen liegen zum einen quantitative Testinstrumente bzw. Skalen zur Erhebung bestimmter Einstellungen und Merkmale vor. Daneben gibt es qualitative Beobachtungsdaten in Form von Videoaufnahmen während des Umgangs der Studierenden mit dynamischen Modellen bzw. den bereitgestellten Experimentiermaterialien. Schließlich gibt es auch qualitative Daten in Form von kurzen Freitexten, die die Studierenden im Laufe des Versuchstages als Ergebnisse bestimmter Aufgabenstellungen eingegeben haben.

Die folgenden Ausführungen zu den quantitativen Daten enthalten vorwiegend Einzelheiten bezüglich der Datengrundlage (Herkunft und Gestaltung der Testaufgaben bzw. Skalen). Bei den qualitativen Daten werden an dieser Stelle neben der Datenaufbereitung und den allgemeinen methodischen Überlegungen bereits die Kategorisierung und Zusammenfassung der Inhalte beschrieben. Diese der Datengrundlage entnommenen Bedeutungsstrukturen zählen innerhalb der qualitativen Forschung bereits zu den Ergebnissen. Allerdings werden diese im darauffolgenden Ergebnisteil quantifiziert und im Sinne des Mixed-Methods-Ansatzes mit den quantitativen Ergebnissen verknüpft.

Tabelle 7: Grundlagen und Typen der in verschiedenen Phasen erhobenen Daten

| Phase | Kapitel | Datengrundlage | Items | Datentyp |
|-------------------------------------|---------|------------------------------------|-------|----------|
| Erhebung der lernbezogenen Merkmale | 4.3.1 | Fachwissenstest zur Brechung | 18 | quant. |
| | | mathematische SWE | 9 | |
| | | experimentierbezogene SWE | 8 | ⋮ |
| | 4.3.2 | computerbezogene SWE | 7 | quant. |
| | | Computerangst | 2 | ⋮ |
| | | Computer beim Lernen | 3 | |
| Arbeit mit dem Modell | 4.3.3 | Bildschirmaufnahmen ^a | - | qual. |
| Formulierung von Hypothesen | 4.3.4 | Freitext | - | qual. |
| Erhebung der Motivation | 4.3.5 | Kurzskala intrinsischer Motivation | 12 | quant. |
| | | Freitext | - | qual. |
| Durchführung des Experiments | 4.3.6 | Videoaufnahmen | - | qual. |
| Vergleich von Modell und Experiment | 4.3.7 | Freitext | - | qual. |

a. Die Arbeit mit dem Modell wurde teilweise auch automatisiert erfasst.

4.3.1 Fachwissenstest zur Brechung

Für die Bestimmung des Fachwissens als individuelle Lernvoraussetzung zum Thema Brechung wurden 18 Aufgaben eines Multiple Choice-Tests verwendet, der für die Studie von Winkelmann (2015) entwickelt und später in dem vom BMBF geförderten *KoPhy* Projekt überarbeitet und erweitert worden war (Weber et al., 2016). Das Testinstrument besteht aus Aufgaben mit einer Fragestellung und vier Antwortmöglichkeiten, von denen nur eine fachlich richtig formuliert ist (einstufig). Sprachlich orientieren sich die Aussagen stark an den typischerweise mit Definitionen und Merksätzen vermittelten fachlichen Konzepten. Einigen Aufgaben enthalten skizzierte oder fotografierte Strahlengänge.

Der Aufgabenpool war bereits mithilfe der in vorherigen Projekten erhobenen Daten innerhalb der probabilistischen Item-Response-Theorie (IRT) anhand eines Rasch-Modells skaliert worden, sodass auf geschätzte Parameter Schwierigkeit b_i und Trennschärfe a_i bei der Auswahl und Auswertung der Aufgaben zurückgegriffen wurde (siehe Tabelle 35 und Aufgaben 1 bis 18 im Anhang). Damit können Likelihood-Funktionen für beliebige Antwortmuster gerechnet werden, die die Wahrscheinlichkeit des Antwortmusters bei gegebener Fähigkeit angeben (Partchev, 2004, S. 21). Umgekehrt liefert das Maximum der individuellen Likelihood-Funktion einen Schätzer für die Fähigkeit der Person im *Fachwissen zur Brechung* (fw_b). Innerhalb der klassischen Testtheorie (KTT) bekommen Personen mit der gleichen Anzahl an richtig gelösten Aufgaben eines Tests das gleiche Testergebnis zugeschrieben. Die Besonderheit des logistischen Modells mit zwei Parametern ist, dass unterschiedliche Kombinationen an richtig und falsch gelösten Aufgaben zu unterschiedlichen Personenfähigkeiten führen, obwohl die Anzahl der richtigen Antworten gleich ist. Mithilfe der unterschiedlichen Maxima der Funktionen werden voneinander abweichende Schätzer für die Personenfähigkeit bestimmt, was eine differenziertere Messung nach sich zieht.

4.3.2 Selbstwirksamkeitserwartungen

Selbstwirksamkeit ist eine kontextbezogene Beurteilung der persönlichen Fähigkeit, eine bestimmte Vorgehensweise auszuwählen und auszuführen, um ein bestimmtes Leistungsniveau zu erreichen (Bandura, 1997, S. 3). Selbstwirksamkeit ist nicht zu verwechseln mit dem Selbstkonzept, das eine allgemeinere Selbsteinschätzung ist, die alle Formen von Selbsterkenntnis und selbstbezogenen Gefühlen einbezieht (Zimmerman, 1995, S. 218). Die pädagogische Psychologie schreibt der wahrgenommenen Wirksamkeit Lernender einen kausalen Effekt in

4 Dynamische Modelle im Praktikum der Optik

Bezug auf verschiedene Aspekte zu: Motivation und andere affektive Reaktionen auf den Lernprozess, Leistungserfolg und Fähigkeit, das eigene Lernen zu regulieren (Zimmerman, 1995, S. 226). Innerhalb der Selbstwirksamkeitstheorie werden verschiedene Informationsquellen diskutiert, die die Selbstwirksamkeit einer Person beeinflussen. So spielen neben eigenen Erfahrungen und Selbsteinschätzungen auch indirekte Erfahrungen, äußere Beeinflussung sowie emotionale Zustände eine Rolle. Trotz allem gilt die auf eigenen Erfahrungen basierende Selbsteinschätzung als besonders einflussreich (Bandura, 1977, S. 195). In den PISA Studien zeigten Schütte et al. (2007), dass das allgemeine Fähigkeitsselbstkonzept in Bezug auf die Naturwissenschaften einen geringeren Zusammenhang mit der gemessenen naturwissenschaftlichen Kompetenz hat ($r = .26$, $p < .001$) als die kontextbezogene SWE der Lernenden ($r = .45$, $p < .001$, S. 138). Aus diesem Grund werden SWE in Studien als Lernendenmerkmal erfasst (vgl. Mézes, 2016).

Mathematische Selbstwirksamkeitserwartungen

Zur Messung der *mathematischen SWE* (mse) wurde nach einer Einstufung der Fähigkeiten in verschiedenen Bereichen gefragt. In mathematikdidaktischen Überlegungen und in der Untersuchung von Bescherer (2004) der Studierfähigkeit von Studierenden unterteilen sich verschiedene mathematische Kenntnisse und Fähigkeiten in Prozessfähigkeiten, mathematisches Handwerk, einen geometrisch/graphischen Bereich und den Umgang mit Wahrscheinlichkeiten (S. 97). Zur Erfassung der mathematischen SWE von Studierenden der Physik auf Lehramt an Haupt- und Realschulen wurde eine Auswahl an Fähigkeiten getroffen, auf die sie in ihrem Studium und im späteren Schuldienst besonders angewiesen sind (siehe Tabelle 36 im Anhang). Einige Fähigkeiten der ursprünglichen Untersuchung wie Beweisen, Kurvendiskussion oder Umgang mit Wahrscheinlichkeiten wurden ausgeschlossen, während der geometrisch/graphische Bereich (im Folgenden als Visualisierung bezeichnet) durch die Fähigkeit *elementare Darstellungen verstehen* (msev2) erweitert wurde.

Experimentierbezogene Selbstwirksamkeitserwartungen

Zur Messung der *experimentierbezogenen SWE* (ese) wurde auf eine angepasste Skala von Schroedter und Körner (2012) zurückgegriffen, die die „subjektive Überzeugung, Experimente im Rahmen des naturwissenschaftlichen Unterrichts auf Grund [sic] eigener Kompetenz erfolgreich durchzuführen“ (S. 164), mit

acht Items abfragt (siehe Tabelle 37 im Anhang). Bei voller Zustimmung implizieren die Aussagen eine erfolgreiche Durchführung eines Experiments selbst bei Komplexität, Zeitdruck oder fehlender Hilfestellung. Die Anpassungen betreffen einzelne Begriffe bezüglich der Lernsituation im Praktikum. Erwartungsgemäß stellt die *experimentierbezogene SWE* der Teilnehmenden einen guten Prädiktor für ihre Experimentierkompetenz dar.

Computerbezogene Selbstwirksamkeitserwartungen

Zur Messung der *computerbezogenen SWE* (cse) wurde auf eine Skala von Spannagel und Bescherer (2009) zurückgegriffen, die „Überzeugung einer Person, Handlungen am Computer erfolgreich durchführen zu können“ (S. 26), mit 30 Items erfasst. Im Folgenden ist eine verkürzte Fassung mit 13 Items veröffentlicht worden (Spannagel & Bescherer, 2012, zitiert nach Mézes, 2016, S. 108f), von denen sieben die SWE betreffen, zwei die *Computerangst* abfragen (can) und drei die Einstellung zum *Computer beim Lernen* (cle, siehe Tabelle 38 im Anhang). Bei Analysen sollten die „allgemeinen Items“ von diesen spezifischen Bereichen getrennt betrachtet werden (Spannagel & Bescherer, 2009, S. 37).

4.3.3 Erfassung der Arbeit mit dem dynamischen Modell

Um charakteristische Merkmale der Arbeit mit dynamischen Modellen zu erfassen, wurde ein Modell zum Lichtweg durch eine Halbkreisscheibe als Untersuchungsgegenstand ausgewählt. Es wurde so gestaltet, dass die zwei typischen Interaktionsmöglichkeiten mit dynamischen Modellen möglich sind:

- Verschieben eines Objekts in der Grafikanzeige durch Halten, Ziehen und Loslassen eines Punktes mit der Maus
- Veränderung eines Parameters mithilfe eines Schiebereglers

Hinzu kommt die Möglichkeit, zunächst ausgeblendete Objekte mithilfe von Kontrollkästchen sichtbar zu machen.

In dem vorliegenden Modell können insgesamt sechs Bestandteile variiert werden. Dabei handelt es sich um die Punkte Q , P und B , den Schieberegler n_2 sowie die zwei Kontrollkästchen *Winkelscheibe* und *Verlängerung* β_1 (siehe Abbildung 26).³¹ Laut de Jong (2019) ist die Nutzung eines Lernmediums erfolgreicher, wenn es in der Kombination mit einer geeigneten Anleitung und genügend Unterstützungsmöglichkeiten verwendet wird. Alle Interaktionsmöglichkeiten sowie

³¹ Nachdem die Winkelscheibe mithilfe des Kontrollkästchens eingeblendet wurde, kann sie in der Grafikanzeige verschoben werden. Allerdings wird das nicht zusätzlich gezählt.

4 Dynamische Modelle im Praktikum der Optik

der Modellinhalt wurden den Teilnehmenden in einem Beschreibungstext mitgeteilt, der während der Arbeit mit dem Modell jederzeit einsehbar war:

In dem folgenden Modell wird der Lichtweg ausgehend von Quelle Q durch einen Punkt P auf einer Halbkreisscheibe mit dem Brechungsindex n_2 angezeigt. Außerhalb der Scheibe befindet sich Luft ($n_1 \approx 1$).

Verschieben Sie den Punkt P entlang der Grenzfläche, um verschiedene Eintrittsstellen zu modellieren.

Verschieben Sie die Quelle Q im linken Bereich des Modells, um verschiedene Einfallswinkel α_1 zu modellieren. Sie können zusätzlich auch den Brechungsindex der Scheibe und ihre Größe über den Punkt B verändern.

Außerdem lässt sich eine Winkelscheibe, wie sie üblicherweise in einem Experimentierset vorkommt, durch das Anklicken des Kontrollkästchens anzeigen und mit der Maus bewegen.

Eine gedachte Verlängerung des Brechungswinkels β_1 , der mithilfe der Halbkreisscheibe üblicherweise gemessen werden soll, kann hinzugefügt werden. (Teichrew, 2022a, Brechungsgesetz, Modell 1)

Ziele des Modells

Ausgehend von den angebotenen Interaktionsmöglichkeiten sind die stattfindenden Interaktionen von Interesse, die als *Ziele des Modells* (mzi) bezeichnet werden.³² Zunächst wurde erfasst, ob und welche *Bestandteile des Modells variiert* werden (mVar). Allerdings kann die Variation mehr oder weniger intensiv ausfallen. Die Auswirkung der Veränderung eines Parameters auf das Modell könnte sich entweder auf den Bereich in der Nähe des Startwerts in der Mitte beschränken oder auch die Randbereiche einschließen. Auf diese Weise lässt sich ein Verhalten beobachten, das auf die Untersuchung der Grenzen des Modells ausgerichtet ist. In dem betrachteten Modell handelt es sich um die vier *Randbereiche* der Punkte Q, P und B sowie des Schiebereglers n_2 , die in Abbildung 26 angedeutet sind (mRan).

Neben der explorativen Untersuchung einzelner Parameter sind außerdem zielgerichtete Einstellungen von Interesse, die am Modell vorgenommen werden, um eine bestimmte Situation herzustellen. Es kann sich dabei um die Einstellung eines bestimmten Wertes oder das Zusammenspiel von mehreren Bestandteilen

³² Mit *Ziel* sind in dem Modell verankerte „Meilensteine“ gemeint, die durch gewissen Interaktionen erreicht werden können. Es handelt sich um theoretisch mögliche Handlungen im Modell und teilweise auch um Handlungen, die den Lerninhalt betreffen.

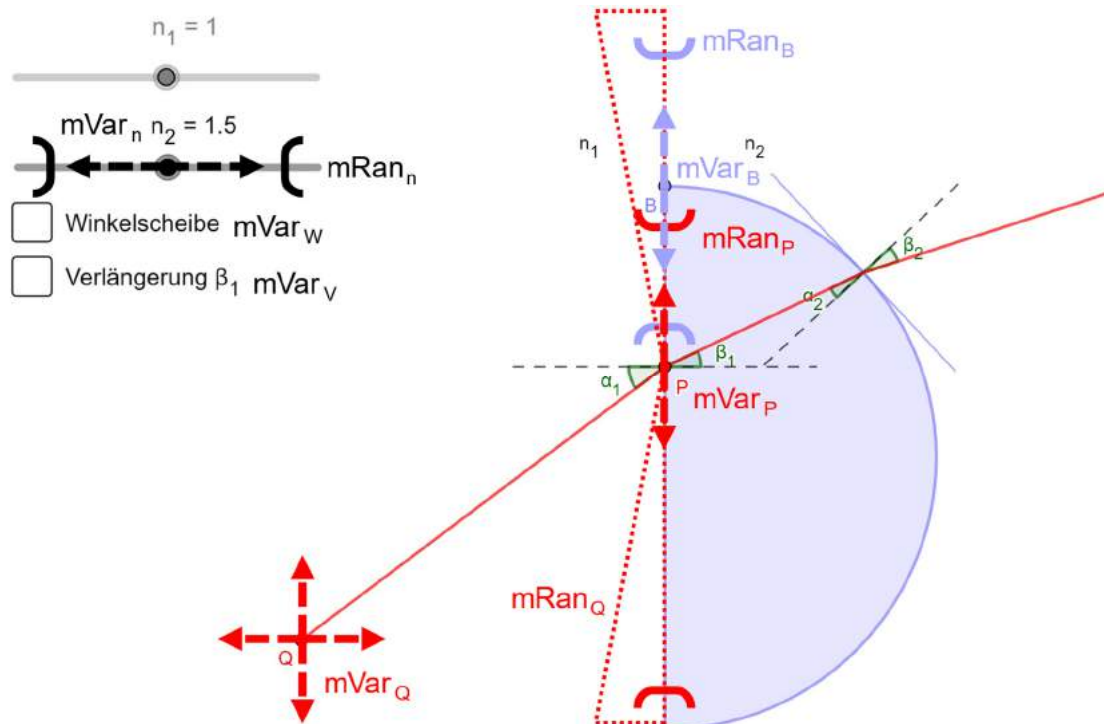


Abbildung 26: Variationsmöglichkeiten im dynamischen Modell zur Brechung an der Halbkreislinse

des Modells handeln, die für den Erkenntnisgewinn bei der Arbeit mit dem dynamischen Modell aufschlussreich sein können. In diesem Fall handelt es sich um vier *messbezogene Einstellungen* (mEin), die die Messung des Brechungswinkels mit realen Materialien betreffen (siehe Abbildung 27):

- Untersuchung des Unterschieds zwischen der Verlängerung des Lichtwegs in der Scheibe mit dem beim Ein- und Austritt gebrochenen Lichtweg in Abhängigkeit von P (a, mEinV).
- Untersuchung der Brechung des Lichts, das durch die Mitte der Halbkreislinse geht und damit nur bei Eintritt gebrochen wird (b, mEinPM).
- Messung des Einfallswinkels α_1 mit der Winkelscheibe, indem die Mitte der Winkelscheibe in den Punkt P geschoben wird (c, mEinPW).
- Vorbereitung der Messung des Brechungswinkels β_1 , indem die Mitte der Winkelscheibe in die Mitte der Halbkreislinse geschoben wird (d, mEinWM).

Die genaue Beschreibung der insgesamt 14 Ziele bei der Arbeit mit dem dynamischen Modell können der Tabelle 39 im Anhang entnommen werden. Die For-

4 Dynamische Modelle im Praktikum der Optik

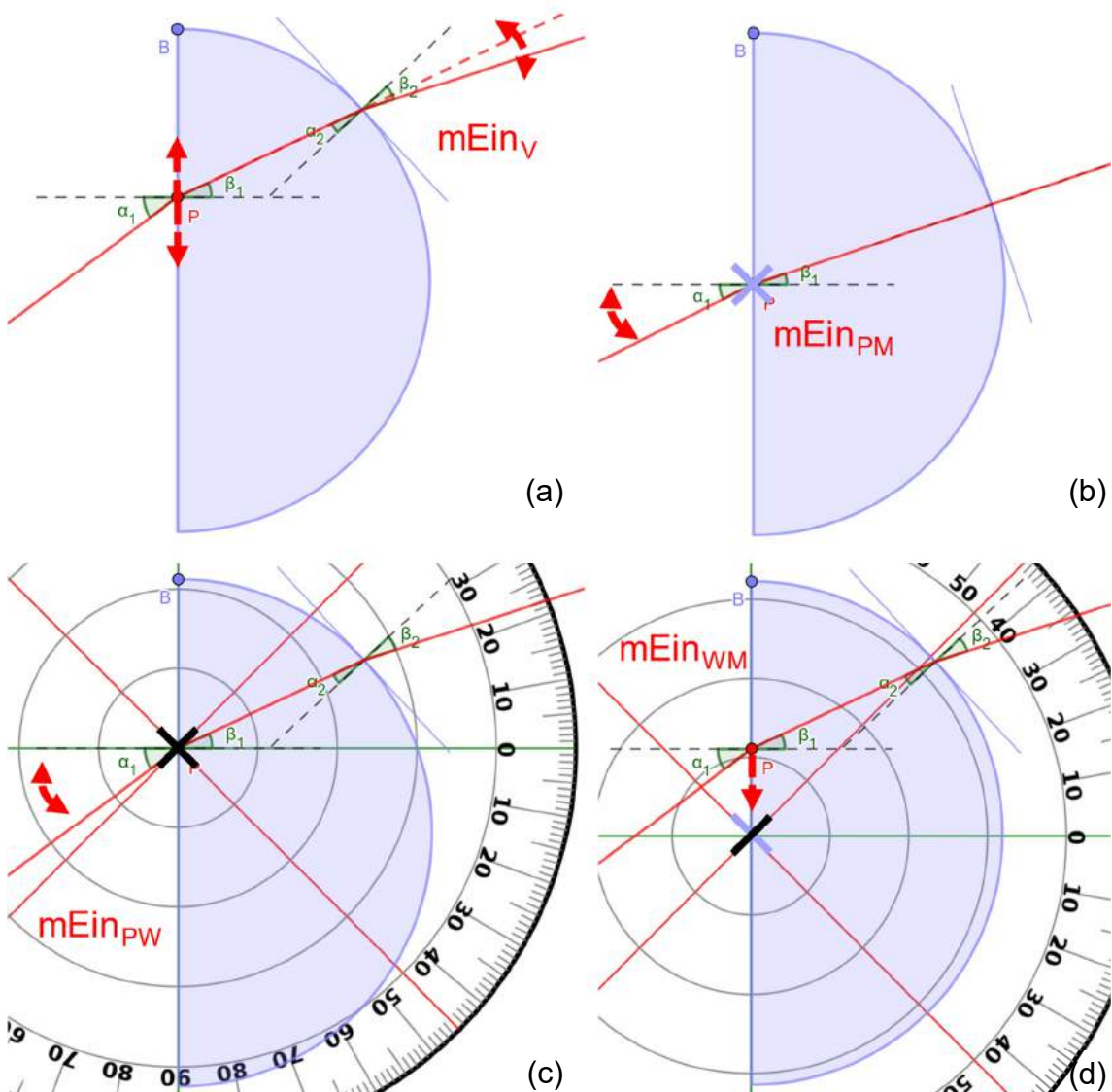


Abbildung 27: Messbezogene Einstellungen (a) bis (d) im dynamischen Modell zur Brechung an der Halbkreisscheibe

mulierung der Ziele erfolgte deduktiv anhand der im Modell angelegten Variationen und im Hinblick auf das im Folgenden durchzuführende Experiment zur Messung der Brechungswinkel am Übergang von Luft zu Plexiglas mithilfe einer Winkelscheibe. Dennoch wurden sie einer kritischen Reflexion unterzogen: Die Erfassung der Ziele erfolgte in einem ersten Schritt anhand von 20 Bildschirmvideos, die während der Arbeit der Studierenden mit dem dynamischen Modell aufgenommen wurden. Das Videomaterial wurde dabei auch nach bisher nicht erfassten Einstellungen oder Handlungen gesichtet. Eine solche Einstellung betrifft beispielsweise den Einfallswinkel α_1 , der auf 0° eingestellt werden kann, sodass zunächst keine Brechung beim Eintritt und nur beim Austritt beobachtet werden

kann (solange sich P nicht in der Mitte befindet). Allerdings hat diese Konstellation für die Messung des Brechungswinkels mit einer Winkelscheibe keine Bedeutung und wurde nicht gesondert erfasst. Neben der grundsätzlichen Bereitschaft das Modell zu erforschen, sind die vier Einstellungen entscheidend, die mit der Ausrichtung des Lichts in die Mitte der Halbkreisscheibe zusammenhängen.

Anhand der Bildschirmvideos wurden die Ziele unabhängig voneinander von zwei Personen erfasst. Die berechneten Kappa-Koeffizienten nach Cohen (1960) in Tabelle 8 deuten auf gute ($.60 < \kappa \leq .80$) bis sehr gute ($\kappa > .80$) Interkoderübereinstimmungen für die Variationen sowie einzelne messbezogene Einstellungen hin (Landis & Koch, 1977). Bei der Erfassung der untersuchten Randbereiche sowie der Verwendung der Verlängerung von β_1 fallen die Übereinstimmungen geringer aus. Das liegt zum einen an der Verwendung von unterschiedlichen Maßstäben bei der Erfassung der Randbereiche. Im Vergleich zur nachträglichen Erfassung galten geringere Variationen zunächst als ausreichend, um das entsprechende Ziel zu erreichen. Zum anderen galt bereits die Einblendung der Verlängerung von β_1 bei $\beta_2 \neq 0$ als Untersuchung der Abweichung, was eine unzureichende Operationalisierung dieses Ziels darstellt. In die Auswertung gehen die anhand der überarbeiteten Maßstäbe in Tabelle 39 im Anhang erfassten Ziele ein.

In einem zweiten Schritt wurden die theoretisch abgeleiteten und mithilfe der Bildschirmvideos empirisch abgesicherten Ziele mit überarbeiteten Maßstäben in das verwendete Modell so einprogrammiert, dass für jedes erreichte Ziel der entsprechende Wahrheitswert automatisch von *false* (falsch) auf *true* (wahr) gesetzt wird.³³ Ein auf diese Weise vorbereitetes GeoGebra-Modell lässt sich als Frage

Tabelle 8: Interkoderübereinstimmung der Erfassung der Ziele des Modells

| Name | mVar | mRan ^b | mEin _{PM} | mEin _V | mEin _{WM} | mEin _{WP} |
|------------|------|-------------------|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| κ^a | .93 | .31 | .61 | .33 | .77 | .89 |

a. Kappa-Koeffizient nach Cohen (1960)

b. Übereinstimmung anhand der Bewertung für mRan_P, mRan_n und mRan _{α}

³³ Die Realisierung der automatischen Erfassung der Ziele bei der Arbeit mit dem dynamischen Modell wurde im veröffentlichten GeoGebra-Buch transparent gemacht und kann dort nachverfolgt werden (Teichrew, 2022a, Brechungsgesetz, Modell 1).

4 Dynamische Modelle im Praktikum der Optik

in einem Test innerhalb des LMS *Moodle* einsetzen.³⁴ Die während der Bearbeitung erreichten Ziele werden dabei erfasst und an das LMS übermittelt. Die aufwendige und nicht immer eindeutige Erfassung der Ziele anhand von Bildschirmvideos ist bei den restlichen Teilnehmenden somit automatisiert und standardisiert durchgeführt worden.

Zeit mit dem Modell

Es gibt zahlreiche Belege dafür, dass die Zeit eine wichtige Rolle bei den Ergebnissen der Lernenden spielt. Ein starker Zusammenhang ist allerdings nicht für die Zeit der Anwesenheit zu erwarten, sondern nur für die Zeit, in der auch Lernaktivitäten stattfinden („engaged time“ oder auch „time-on-task“, Aronson, Zimmerman & Carlos, 1998, S. 3). Außerdem hängt der Effekt der Lernzeit auf die Leistung von den Merkmalen sowohl der Aufgaben als auch der Personen ab (Naumann & Goldhammer, 2017, S. 15). Die *Zeit mit dem Modell* (mze in s) wurde in den 20 Videos als Zeit zwischen dem Öffnen der Modellseite (t_1) und ihrem endgültigen Verlassen bzw. dem Ende der Arbeit an dem Modell (t_2) gezählt. Sie umfasst das Lesen der Beschreibung und die Auseinandersetzung mit dem Modell. Die Zeit zum Formulieren einer Hypothese nach der Arbeit mit dem Modell wird nicht zur Interaktion mit dem Modell gezählt. Die restlichen Teilnehmenden haben mit dem Modell als Teil eines Tests in *Moodle* gearbeitet. Das LMS hat dabei die Gesamtdauer des zweiseitigen Tests erfasst (T_G in s), von der die Zeit zum Schreiben der Hypothese auf Seite 2 abgezogen wurde (T_H in min). Da für diese Arbeit mit dem Modell kein zusätzliches Videomaterial vorliegt, ist es bei einigen außerordentlich langen Testsitzungen nicht möglich zu sagen, ob die restliche Zeit auf Seite 1 komplett für die Arbeit mit dem Modell genutzt wurde oder die Seite mit dem Modell zwischenzeitlich ohne Interaktion geöffnet war.

4.3.4 Qualitative Inhaltsanalyse der Hypothesen

In der qualitativen Forschung gibt es eine Vielzahl an Methoden. Die Entscheidung für eine bestimmte Methode sollte sich am Forschungsgegenstand orientieren. Den Kern einer Methode in der qualitativen Forschung bilden bestimmte Vorgaben für das Vorgehen bei der Datenanalyse. In diesem Fall geht es darum, zu bestimmen, welche Hypothesen die Teilnehmenden nach der Arbeit mit dem

³⁴ Diese Funktion wird durch ein GeoGebra-Plugin in *Moodle* ermöglicht („Moodle plugins directory: GeoGebra“, 2022). Bei jeder Bearbeitung des Modells werden die Namen der Variablen, die durch die Handlungen der Testperson auf *true* gesetzt wurden, als Testergebnis gespeichert. Genauso wie die Studierenden zuvor über die Videoaufnahme informiert wurden, sind weitere Teilnehmende über diese im Modell eingebaute Funktion in Kenntnis gesetzt worden.

dynamischen Modell zur Brechung formuliert haben. Es müssen inhaltliche Muster aus den Daten herausgearbeitet und jene Hypothesen stärker gewichtet werden, die häufiger auftauchen. Letzteres ist sinnvoll, um wiederkehrende Modellergebnisse von Einzelmeinungen zu differenzieren.

Die Anweisung bei der Generierung des Datenmaterials lautete: „Formulieren Sie Hypothesen zum Lichtweg durch eine Halbkreisscheibe basierend auf dem Modell“ (Teichrow, 2022a, Brechungsgesetz, Hypothese 1). Bei den Daten handelt es sich somit um offene Freitextantworten, die „systematisch, regel- und theoriegeleitet“ mit der Methode der qualitativen Inhaltsanalyse ausgewertet wurden, um eine größtmögliche Objektivität, Reliabilität und Validität der Ergebnisse gewährleisten zu können (Krüger & Riemeier, 2014, S. 133f). Um die Antworten der Teilnehmenden mit Blick auf die Fragestellung zusammenzufassen, ist die systematische Kategorisierung mit induktiver Kategorienbildung naheliegend. Die Systematik der qualitativen Inhaltsanalyse sieht vor, dass vorab *Analyseeinheiten* definiert werden (Mayring, 2015, S. 546). Bei dem minimalen Textbestandteil, der ausgewertet wird (*Kodiereinheit*), handelt es sich um einzelne Sätze oder Phrasen bzw. Wortfolgen. In der Textantwort einer Person werden in der Regel mehrere Hypothesen hintereinander formuliert. Es sind aber auch mehrere fachliche Aussagen bezüglich der Brechung in einem einzelnen Satz denkbar. Um die Länge der Kodiereinheit abzuschätzen, wird bei der Entscheidung für eine Kodierung deshalb stets die gesamte Antwort herangezogen (*Kontexteinheit*). Dabei wird nicht das ganze Material durchkodiert, sondern nur Wortfolgen, die eine physikalisch richtige Aussage bezüglich der Brechung enthalten (*Auswertungseinheit*). Es sind Mehrfachkodierungen innerhalb eines Satzes mit verschiedenen Kategorien möglich, aber eine Kategorie kann nur einmal pro Person vergeben werden. Damit sollen verschiedene Sinnzusammenhänge innerhalb einer Antwort differenziert und Wiederholungen nicht unverhältnismäßig gewichtet werden. Grammatikalische Vollständigkeit und Richtigkeit sowie stilistische Stärken oder Schwächen der Aussagen werden nicht bewertet, da sie für die Fragestellung irrelevant sind. Diese Regeln wurden in einer Pilotphase an das Material angepasst und verfeinert. Im endgültigen Materialdurchgang wurden sie jedoch konstant gehalten.

Als Ergebnis konnte aus dem Material zunächst ein Kategoriensystem mit 15 fachlichen Aussagen (Hypothesen) gewonnen werden (siehe Tabelle 40 im Anhang). Das Spektrum der Aussagen erstreckt sich von eher einfachen Aussagen zur Brechung des Lichts beim Ein- oder Austritt allgemein und mit Angabe der

4 Dynamische Modelle im Praktikum der Optik

Richtung (H1 bis H4) – wobei der Brechungsindex n_2 des Materials für die Stärke der Brechung eine Rolle spielt (H5) – über Aussagen zum geradlinigen Lichtweg innerhalb und außerhalb der Halbkreisscheibe (H6), zu den Beziehungen zwischen Einfallswinkel- und Brechungswinkeln (H7), zu Situationen, in denen keine Brechung beim Ein- und Austritt vorliegt (H8 und H9), sowie zum fehlenden Einfluss der Größe der Halbkreisscheibe (H10). Schließlich gibt es auch Aussagen zur Situation, in der das Licht nur beim Eintritt gebrochen wird (H11), dass bei der Brechung an gekrümmten Flächen das Lot senkrecht zur Tangente verläuft (H12), zur Verwendung der Winkelscheibe (H13), zum beobachteten Linseneffekt (H14) und zur Totalreflexion innerhalb der Halbkreisscheibe (H15).

Einige Zeit nach der ersten finalen Kategorisierung wurde das Material noch einmal von derselben Person mit demselben Kategoriensystem ausgewertet. Die gute ($.60 < \kappa \leq .80$) bis sehr gute ($\kappa > .80$) Intrakoderübereinstimmung in Tabelle 9 ist ein Indikator für die Stabilität des Vorgehens. Neben der inhaltlichen Interpretation der Komplexität und Vielfalt der formulierten Hypothesen erlaubt die Inhaltsanalyse durch Zuordnung der Textantworten zu einzelnen Teilnehmenden auch Aussagen darüber zu machen, welche Art von Hypothese eine Person formuliert hat (siehe Tabelle 41 im Anhang). In die Auswertung gehen die Daten der ersten Kategorisierung ein, da sie in einer Zeit vorgenommen wurde, in der eine intensive Auseinandersetzung mit dem Material vorlag.

4.3.5 Motivation bei der Arbeit dem Modell

Motivation steht in der Psychologie für die Bereitschaft, ein zielgerichtetes Verhalten zu demonstrieren. Sie bestimmt dabei solche Verhaltensmerkmale wie z. B. Ausdauer, Strategie oder Intensität der Tätigkeit. Es wird zunächst zwischen der extrinsischen und intrinsischen Motivation unterschieden. In dem einen Fall

Tabelle 9: Intrakoderübereinstimmung der Kategorisierung der Hypothesen

| Name | H1 | H2 | H3 | H4 | H5 |
|------------|-----|-----|------|------|------|
| κ^a | .95 | .85 | 1.00 | .88 | .87 |
| Name | H6 | H7 | H8 | H9 | H10 |
| κ | .72 | .79 | .94 | 1.00 | .73 |
| Name | H11 | H12 | H13 | H14 | H15 |
| κ | .94 | .64 | 1.00 | .92 | 1.00 |

a. Kappa-Koeffizient nach Cohen (1960)

wird ein bestimmtes Verhalten gezeigt, um positive Konsequenzen zu erreichen oder negative zu vermeiden. Das Ziel der Handlung liegt somit vor allem außerhalb der Handlung. Im anderen Fall liegt das Ziel der Handlung innerhalb der Handlung, was die Basis für Neugier und Explorationsverhalten darstellt, das vor allem ohne äußere Anreize erfolgt (Schiefele & Schaffner, 2015, S. 157).

Die Selbstbestimmungstheorie nach Deci und Ryan (1985) stellt intrinsische und bestimmte extrinsische Motivationsquellen in Bezug zu dem *Selbst*. Demnach beruht ein Großteil der menschlichen Motivation auf einer Reihe angeborener psychologischer Grundbedürfnisse. Es werden drei solcher Bedürfnisse unterschieden: Autonomie, Kompetenz und soziale Eingebundenheit. Der Mensch verbindet positive Erlebnisse mit Handlungen, bei denen er (a) keinen äußeren Druck verspürt und Entscheidungen selbstbestimmt treffen kann, (b) effektiv und kompetent mit seiner Umwelt interagiert und (c) unterstützende Beziehungen zu anderen Menschen aufbauen kann. Allerdings spielt die soziale Eingebundenheit außerhalb von zwischenmenschlichen Aktivitäten eine eher entfernte Rolle bei der Aufrechterhaltung der intrinsischen Motivation (Deci & Ryan, 2000, S. 235).

Kurzskala intrinsischer Motivation

Aus lern- und motivationspsychologischer Sicht bietet das computergestützte Lernen viele Vorteile. Urhahne, Prenzel, von Davier, Senkbeil und Bleschke (2000) konnten beispielsweise zeigen, dass der Computereinsatz intrinsisch motivierte Handlungen und das Erarbeiten funktionaler Zusammenhänge in einem individuellen Lerntempo ermöglichen kann. Die intrinsische Motivation der Teilnehmenden, sich mit dem dynamischen Modell auseinanderzusetzen, wird mit der *Kurzskala intrinsischer Motivation* (KIM) von Wilde, Bätz, Kovaleva und Urhahne (2009) erfasst. Es handelt sich dabei um eine übersetzte und auf zwölf Items gekürzte Version der Standardversion des *Intrinsic Motivation Inventory*, die 22 Items umfasst.³⁵ Sie kann dort zum Einsatz kommen, wo „selbstbestimmtes und kompetentes Handeln im Vordergrund stehen“ (Wilde et al., 2009, S. 42). Obwohl der Gesamtfragebogen als Kurzskala der *intrinsischen Motivation* bezeichnet wird, wird diese strenggenommen nur durch die Subskala *Interesse/Vergnügen* (kimi) erhoben. Die Konzepte der *wahrgenommenen Kompetenz* (kimk) und *wahrgenommenen Wahlfreiheit* (kimw) werden als positive Prädiktoren sowohl für die Selbsteinschätzung als auch für die intrinsische Motivation gesehen.

³⁵ Verfügbar nach Anmeldung auf der Webseite des *Center for Self-Determination Theory* (CSDT, n. d.).

4 Dynamische Modelle im Praktikum der Optik

Die Subskala *Druck/Anspannung* (kimd) wird hingegen als negativer Prädiktor für die intrinsische Motivation herangezogen. Die Items des Originals betreffen eine nicht näher bestimmte Tätigkeit (*activity*) oder Aufgabe (*task*). Es ist jedoch möglich, die Skala an bestimmte Aktivitäten anzupassen. Zur Überprüfung wurde die KIM nach einem Museumsbesuch eingesetzt, sodass es sich um eine „Tätigkeit in der Ausstellung“ handelte. In der hier vorgestellten Studie sollten die Teilnehmende ihre Zustimmung zu Aussagen angeben, die ihre „Arbeit mit den Modellen“ betreffen, denen sie innerhalb der Lernumgebung begegnet sind (siehe Tabelle 42 im Anhang).

Motivationsaspekte

Neben der Bestimmung von Werten in den verschiedenen Subskalen war es im Rahmen einer explorativen Untersuchung interessant zu erfahren, welche *Motivationsaspekte* bei der Arbeit mit einem dynamischen Modell vorgefunden werden können. Deshalb wurden die Teilnehmenden nach der Bearbeitung des Fragebogens nach einer Begründung ihrer Zustimmung oder Ablehnung der Items gefragt. Die folgenden Fragen wurden in Abhängigkeit der vorherigen Antworten angezeigt, um Aspekte zu bestimmen, die sich positiv auf die Motivation ausgewirkt haben:

- Was fanden Sie an der Arbeit mit Modellen interessant?
- Was macht Sie mit Ihrer Leistung bei der Arbeit mit den Modellen zufrieden?
- Wodurch konnten Sie die Arbeit mit Modellen selbst steuern?
- Wodurch hatten Sie keine Bedenken, ob Sie die Arbeit mit den Modellen gut hinbekommen?

Lehnten die Teilnehmenden einzelne Aussagen des Fragebogens ab, konnten sie sich im Folgenden bezüglich der negativen Motivationsaspekte entsprechend äußern:

- Was hat Ihnen bei der Arbeit mit Modellen keinen Spaß gemacht?
- Was hat Sie daran gehindert, sich bei der Arbeit mit Modellen geschickt anzustellen?
- Was hat Sie daran gehindert, bei der Arbeit mit den Modellen so vorzugehen, wie Sie es wollten?
- Wodurch fühlten Sie sich bei der Arbeit mit Modellen unter Druck?

Auf diese Weise wurden nur die Teilnehmenden gebeten, sich zu positiven bzw. negativen Aspekten zu äußern, die zuvor eine positive bzw. negative Einschätzung gegeben haben. Damit wird die Zahl der unpassenden Fragen reduziert und die Menge an relevanten Daten gesteigert. Da die KIM bereits eine generelle Einschätzung bezüglich der Motivation der einzelnen Personen liefert, wurden die positiven oder negativen Aspekte nicht personenbezogen ausgewertet, sondern inhaltlich zusammengefasst und sortiert.

Gemäß der qualitativen Inhaltsanalyse wurden Wortfolgen, die einen positiven oder negativen Einfluss auf die Motivation bei der Arbeit mit dem Modell beschreiben, in mehreren Durchgängen induktiven Kategorien zugeordnet. Als Ergebnis konnten aus dem gesammelten Datenmaterial 16 positive und 18 negative Aspekte extrahiert werden (siehe Tabelle 43 und Tabelle 44 im Anhang). Obwohl sich die Fragen auf unterschiedliche Bestandteile der Motivation beziehen, gibt es Aspekte, die mehrfach vorkommen. Das ist allerdings nicht verwunderlich, da z. B. technische Schwierigkeiten einen negativen Einfluss auf das Vergnügen und die wahrgenommene Kompetenz haben und dadurch zu mehr Anspannung führen können. Deshalb werden bei der weiteren Analyse der qualitativen Daten die Subskalen nicht weiter betrachtet, sondern die Art und Häufigkeit der positiven bzw. negativen Aspekte.

In Anlehnung an die Motivationsforschung, die die Ziele einer Handlung in innerhalb der Handlung (selbstbestimmt, intrinsisch) oder außerhalb der Handlung (fremdbestimmt, extrinsisch) unterteilt, wurden die positiven bzw. negativen Motivationsaspekte ebenfalls dieser Unterteilung unterzogen. Es wurden zum einen alle Aspekte identifiziert, die sich auf die Möglichkeiten und Erfahrungen beziehen, die unmittelbar mit der Arbeit mit dem Modell zusammenhängen (innerhalb der Handlung, siehe Tabelle 10). Zum anderen bilden alle Aspekte eine Gruppe, die mit der Organisation des Lernprozesses, der Gestaltung der Lernumgebung oder den persönlichen Vorerfahrungen und Vorlieben zu tun haben (außerhalb der Handlung). Bei der Gegenüberstellung der Aspekte wird deutlich, dass teilweise der gleiche Sachverhalt, z. B. dass es sich um eine Lernaktivität mit einem digitalen Medium handelt, sowohl als positiver als auch negativer Aspekt vorkommt. Das hängt wiederum von den individuellen Lernvoraussetzungen der einzelnen Teilnehmenden ab.

4.3.6 Erfassung der Durchführung des Experiments

Nach der Arbeit mit dem Modell folgte die für ein Praktikum übliche Versuchsdurchführung mit bereitgestellten Experimentiermaterialien. Das Material wurde so gewählt, dass die modellierte Situation im Experiment überprüft werden kann:³⁶

Tabelle 10: Aufteilung der positiven und negativen Aspekte in innerhalb und außerhalb der Handlung

| | positive Aspekte | | negative Aspekte |
|------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|--|
| innerhalb der Handlung | selbstbestimmte Exploration | ↔ | Unbestimmtheit |
| | Elementarisierung und Visualisierung | ↔ | unklare Elementarisierung und Visualisierung |
| | übersichtliche Gestaltung des Modells | ↔ | unübersichtliche Gestaltung des Modells |
| | Aufbau neuer Vorstellungen | ↔ | keine neuen Vorstellungen |
| | Modellierung verschiedener Fälle | | ungewohnte Aufgabenstellung |
| | Überprüfung bestehender Vorstellungen | | |
| | Benutzerfreundlichkeit | | |
| außerhalb der Handlung | Abwechslung | ↔ | monotone Arbeitsweise |
| | Erfahrung mit GeoGebra | ↔ | fehlende Erfahrung mit GeoGebra |
| | Vorkenntnisse in der Optik | ↔ | fehlende Vorkenntnisse in der Optik |
| | Lernen mit digitalen Medien | ↔ | Abneigung gegenüber digitalen Medien |
| | keine Zeitvorgabe | ↔ | Zeitdruck |
| | vollständige Bearbeitung | | unangenehme Beobachtung |
| | in der Lernumgebung navigieren | | Konzentrationsschwäche |
| | Erklärung durch den Betreuer | | technische Schwierigkeiten |
| | grundsätzlich positive Einstellung | | Angst vor Fehlern |
| | | | Schamgefühl |
| | | Vergleich innerhalb der Gruppe | |
| | | Teilnahme an einer Studie | |
| | | Einzelarbeit | |

Anmerkung. Die Pfeile (↔) markieren Aspekte, die das direkte Gegenteil voneinander darstellen.

³⁶ Als *Experiment* wird im Folgenden nur der Teil des Praktikumsversuchs bezeichnet, der unmittelbar mit der Studie zusammenhängt (siehe Kapitel 4.2.2). Am Praktikumstag wurden mit zusätzlichen Materialien weitere Experimente und Messungen in der Versuchsbeschreibung angeleitet und durchgeführt, die allerdings für die Studie nicht relevant sind.

Zwei Halbkreisscheiben aus Plexiglas (groß und klein)

Ein Linienlaser

Eine Winkelscheibe (Teichrew, 2022, Experiment zum Brechungsgesetz, Planung)

Die Teilnehmenden haben davor Hypothesen zum Verhalten des Lichts beim Durchqueren der Halbkreisscheibe aufgestellt, sodass ihre Überprüfung als Ziel für diesen Teil des Praktikumsversuchs ausgewiesen wurde.

Die begleitende Aufgabenstellung lautete: „Betrachten Sie verschiedene Lichtwege durch die Halbkreisscheiben aus Plexiglas mithilfe des Linienlasers“ (ebd., Experiment zum Brechungsgesetz, Durchführung). Es handelt sich um eine offene Aufgabe, da keine konkreten Schritte oder ein bestimmter Versuchsaufbau vorgegeben wurden. Die Teilnehmenden sollten sich vor allem von ihren Erfahrungen während der Arbeit mit dem Modell leiten lassen, diese im Experiment nachstellen und eigenständig überprüfen. Darauf aufbauend erfolgte die eigenständige Messung der Brechungswinkel beim Eintritt in Plexiglas in Abhängigkeit der Einfallswinkel in 5° Schritten bis 45° . Eine Skizze des Aufbaus für den Messvorgang oder eine Schritt-für-Schritt-Anleitung wurde den Teilnehmenden nicht bereitgestellt.

Ziele des Experiments

Es lassen sich wiederum mehrere *Ziele des Experiments* (ezi) deduktiv ableiten, die mit den vorhandenen Materialien erreicht werden können. Es handelt sich um eine Teilmenge der Ziele, die auch im dynamischen Modell erreicht werden konnten, aber diesmal mit realen Gegenständen (siehe Tabelle 45 im Anhang). Mit der Größe der verwendeten Halbkreisscheibe, der Eintrittsstelle, dem Eintrittswinkel und der Winkelscheibe bleiben im Experiment vier *Bestandteile*, die *variiert* werden können (eVar). Mit der Eintrittsstelle und dem Eintrittswinkel gibt es zwei Variablen, deren *Randbereiche* und somit das Grenzverhalten des Systems *untersucht* werden können (eRan). In der Vorbereitung der nachfolgenden Messungen, wurden außerdem alle vier bereits im Modell identifizierten *messbezogenen Einstellungen* als mögliche Ziele im Experiment aufgefasst (eEin).

Die Erfassung der Ziele wurde anhand von Videoaufnahmen im Laufe des Experiments realisiert. Die Kamera wurde dabei so aufgestellt, dass ein markierter Bereich des Tisches, in dem alle experimentellen Handlungen von den Teilnehmenden vollzogen werden sollten, von oben gefilmt wurde. Auf den Aufnahmen können auch die Gespräche innerhalb der Gruppe gehört werden. Sie decken

4 Dynamische Modelle im Praktikum der Optik

(sofern vorhanden) die Intention der von den Teilnehmenden im Video vollzogenen Handlungen auf, was bei der Erfassung der erreichten Ziele teilweise geholfen hat. Die Ziele wurden von zwei Personen anhand der Videos unabhängig erfasst. Die berechneten Kappa-Koeffizienten in Tabelle 11 deuten auf gute ($.60 < \kappa \leq .80$) bis sehr gute ($\kappa > .80$) Interkoderübereinstimmungen für die Variationen sowie einzelne messbezogene Einstellungen. Die Zuordnung der Ziele bezüglich der Untersuchung der Randbereiche ist auch in diesem Fall weniger eindeutig, aber verlief einheitlicher als bei der Arbeit mit dem Modell. Nur das Ziel, welches die Absicht der Teilnehmenden betrifft, den Einfluss der Eintrittsstelle auf die Stärke der Brechung beim Austritt zu untersuchen, konnte nicht objektiv erfasst werden. Es lässt sich nicht sicher auf die im Video beobachteten Bewegungen zurückführen, die auch mit einer anderen Intention durchgeführt werden können. Im Modell diente die virtuelle Verlängerung, die im Vorfeld der Bewegung aktiviert wurde, als Indikator für dieses Ziel.

Zeit mit dem Experiment

Im Falle des Experiments wurde die *Zeit mit dem Experiment* (eze) ausschließlich anhand der aufgenommenen Videos erfasst. Es handelt sich dabei um die Zeit zwischen der ersten Interaktion mit den bereitgestellten Materialien, wie z. B. das Verschieben einer Halbkreisscheibe in den von der Kamera erfassten Experimentierbereich (t_1), und der letzten experimentellen Handlung vor der abschließenden Protokollierung der Beobachtungen (t_2).³⁷ In der Zwischenzeit haben die Gruppen üblicherweise mehrfach ihre experimentellen Handlungen unterbrochen, um eine formulierte Beobachtung direkt zu notieren. Teilweise führte eine Person Handlungen durch und die andere Person hat geschrieben. Solange die Gruppe die Auseinandersetzung mit den Materialien danach fortgesetzt hat, wurde die Zeiterfassung nicht unterbrochen. Dadurch unterscheiden sich die erfassten Zeiten des Experimentierens von der Zeit der Arbeit mit dem Modell: Während das Modell eigenständig bearbeitet wurde und es getrennte Phasen der

Tabelle 11: Interkoderübereinstimmung der Erfassung der Ziele des Experiments

| Name | eVar | eRan | eEin _{PM} | eEin _V | eEin _{WM} | eEin _{WP} |
|------------|------|------|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| κ^a | .86 | .58 | 1.00 | .11 | 1.00 | .67 |

a. Kappa-Koeffizient nach Cohen (1960)

³⁷ Für die Gruppe 3637 liegen zwei Videos für diese Phase vor, sodass zusätzlich die Start- und Endzeit t_3 und t_4 im zweiten Video erfasst wurden.

Interaktion mit den Bestandteilen des Modells sowie der Formulierung von Hypothesen gab, gehen in der Experimentierphase Handlung, Gruppengespräch und Protokollierung ineinander über.

4.3.7 Qualitative Inhaltsanalyse des Vergleichs von Modell und Experiment

Die Protokollierung der Experimentierphase erfolgte in Bezug auf die Aufgabenstellung: „Notieren Sie alle Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen dem Modell zum Lichtweg durch die Halbkreisscheibe und dem Experiment vor Ihnen“ (Teichrow, 2022, Experiment zum Brechungsgesetz, Durchführung). Mithilfe des gesammelten Datenmaterials lässt sich herausfinden, welche Gemeinsamkeiten und Unterschiede die Studierenden erkennen und infolgedessen aufschreiben. Dafür wurden die schriftlichen Protokolle transkribiert und nach Gemeinsamkeiten und Unterschieden getrennt. In der Regel haben die Studierenden ihre Ausführungen eigenständig mit den passenden Überschriften strukturiert. Als Gemeinsamkeit zählen Beschreibungen von Inhalten, die sowohl im Modell als auch im Experiment enthalten sind und somit in beiden Darstellungen beobachtet werden können. Bei den Unterschieden werden zusätzlich zwei Arten getrennt betrachtet, je nachdem ob eine Eigenschaft des Modells oder des Experiments im Vordergrund steht. Dabei ist es unerheblich, ob die Aussage z. B. so formuliert ist, dass das Modell bestimmte Eigenschaften enthält oder im Experiment bestimmte Eigenschaften des Modells fehlen. In beiden Fällen ist das Modell im Vordergrund und nicht das Experiment. Für die auf diese Weise vorstrukturierten Daten wurden Wortfolgen induktiv gebildeten Kategorien gemäß der qualitativen Inhaltsanalyse zugeordnet (siehe Tabelle 46 und Tabelle 47 im Anhang). Bei den Gemeinsamkeiten handelt es sich in erster Linie um Beobachtungen bezüglich des gebrochenen Lichtwegs, die bereits nach der Arbeit mit dem Modell als Hypothesen formuliert wurden, die somit bestätigt werden konnten (GH1 bis GH4). Außerdem wird eine generelle Ähnlichkeit der zwei untersuchten Systeme hervorgehoben, was den Aufbau und die Variabilität der Bestandteile angeht (Sys). Bei den Unterschieden des Modells im Vergleich zum Experiment wird die größere Anzahl der Variablen, die im Modell verändert werden können, angesprochen (Var). Außerdem werden die im Modell vorherrschenden Idealisierungen beschrieben: Zum einen wird auf die Genauigkeit der im Modell angegebenen Werte wie z. B. der Winkel verwiesen (Gen). Zum anderen werden die im Modell absichtlich vorgenommenen Vereinfachungen wie z. B. nicht konstruierte Strah-

4 Dynamische Modelle im Praktikum der Optik

len erläutert (Ver). Schließlich werden die als Hilfestellung in das Modell zusätzlich eingebauten Objekte wie z. B. das Lot erwähnt (Hil). Bei der anderen Art der Unterschiede werden einige Beobachtungen im Experiment hervorgehoben, die im Modell nicht gemacht werden konnten. Dabei handelt es sich um die Totalreflexion des Lichts im Inneren des Halbkreiskörpers (Tot) und die Reflexion des Lichts an der ersten Grenzfläche (Ref). Außerdem wird das Licht angesprochen, das aufgrund der Bauweise des Linienlasers von oben in die Halbkreisscheibe eindringt und ungebrochen erscheint (Ung). Schließlich wird in Anbetracht der im Modell berechneten Winkel auf mögliche Messfehler, die während des Experiments auftreten können, hingewiesen (Mes).

Die Reliabilität der Zuordnungen der Gemeinsamkeiten und Unterschiede in die gebildeten Kategorien wurde ebenfalls geprüft. Das Material wurde von derselben Person nach einiger Zeit neu ausgewertet. Die fast durchgehend sehr gute ($\kappa > .80$) Intrakoderübereinstimmung in Tabelle 12 spricht für eine klare Verteilung der genannten Aspekte.

4.4 Ergebnisse

Die weitere Darstellung der Ergebnisse weicht von der chronologischen Reihenfolge der Datenerhebung ab. Stattdessen werden die quantitativen und qualitativen Daten zunächst getrennt beschrieben (siehe Kapitel 4.4.1 und 4.4.2). Dabei werden innerhalb einer explorativen Datenanalyse die Verteilungen und Mittelwerte bzw. relative Häufigkeiten der einzelnen beobachteten Merkmale betrachtet. Danach werden Schritte zur Datenreduktion unternommen. Dementsprechend werden die im Modell bzw. Experiment erreichbaren Ziele zu wenigen Faktoren zusammengefasst. Es folgen Zusammenhangsanalysen zunächst innerhalb der einzelnen Datentypen, die auf direkt in Beziehung stehende Phasen des

Tabelle 12: Intrakoderübereinstimmung der Kategorisierung der Gemeinsamkeiten und Unterschiede

| Name | GH1 | GH2 | GH3 | GH4 | Sys |
|------------|-----|-----|------|------|------|
| κ^a | .95 | .84 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |

| Name | Var | Gen | Ver | Hil |
|----------|------|-----|------|-----|
| κ | 1.00 | .94 | 1.00 | .79 |

| Name | Tot | Ref | Ung | Mes |
|----------|-----|-----|------|------|
| κ | .92 | .95 | 1.00 | 1.00 |

a. Kappa-Koeffizient nach Cohen (1960)

Lernprozesses Schritt-für-Schritt ausgeweitet werden (siehe Kapitel 4.4.3). Die berechneten Zusammenhänge können zwar keine Kausalitäten aufdecken oder belegen, in explorativen Studien dienen sie vor allem der Generierung datengestützter Hypothesen zur weiteren Überprüfung. Schließlich werden Ähnlichkeiten zwischen den Personen mithilfe von Clusteranalysen aufgedeckt, um Gruppen mit spezifischen Verhaltensmustern bei der Arbeit mit einem dynamischen Modell zu identifizieren (siehe Kapitel 4.4.4).

4.4.1 Quantitativ erhobene Merkmale

Bei den quantitativ erhobenen Merkmalen handelt es sich um das Fachwissen der Studierenden in Bezug auf das Thema Brechung, ihre SWE, die intrinsische Motivation nach der Arbeit mit dem Modell und auch die Zeiten. Um die Einordnung der Ergebnisse zu erleichtern, wurden Personenfähigkeiten und Skalenwerte jeweils so umkodiert, dass der kleinstmögliche Wert bei 0 und der größtmögliche Wert bei 1 liegt. Die mit diesen Werten ermittelten Mittelwerte M und zugehörige Standardabweichungen SD der eingesetzten Skalen sowie der Standardfehler des Mittelwerts SEM und die Grenzen eines 95 %-Konfidenzintervalls können der Tabelle 48 im Anhang entnommen werden. Außerdem wird für Skalen mit mehr als einem Item das Cronbachs Alpha nach Cronbach (1951) als Maß für die interne Konsistenz angegeben. Damit wird geprüft, ob mithilfe der verschiedenen Aussagen jeweils dasselbe Merkmal gemessen wird. Die Mehrheit der Skalen weist eine exzellente ($\alpha > .90$) bis gute ($.80 < \alpha \leq .90$) interne Konsistenz auf (Blanz, 2021, S. 250). Die Skala *Computer beim Lernen* (cle) ist nach der gängigen Richtlinie akzeptabel ($.70 < \alpha \leq .80$), während die Subskala *wahrgenommene Wahlfreiheit* (kimw) als fragwürdig eingestuft werden muss ($.60 < \alpha \leq .70$). Die Aussagen können dennoch als ein Merkmal behandelt werden. Die zwei Aussagen zur *Computerangst* (can) haben eine inakzeptable interne Konsistenz ($\alpha \leq .50$), sodass für diese Items im Folgenden getrennte Angaben gemacht werden. Die Skalenwerte sind gemäß dem Signifikanzwert des Tests auf Normalverteilung nach Shapiro und Wilk (1965) in vielen Fällen nicht normalverteilt, was ebenfalls der Tabelle 48 im Anhang entnommen werden kann ($p < .05$). Allerdings reicht ein „ausreichend großer“ Stichprobenumfang gemäß dem zentralen Grenzwerttheorem aus, um von einer normalverteilten Mittelwertverteilung (selbst bei nicht normalverteilten Populationen) ausgehen zu können, wobei häufig $N > 30$ als notwendige Voraussetzung genannt wird (Bortz

4 Dynamische Modelle im Praktikum der Optik

& Schuster, 2010, S. 86f). Es gibt zudem genügend Belege, dass Varianzanalysen robust gegenüber einer Verletzung der Normalverteilung sind (vgl. Blanca, Alarcón & Arnau, 2017; Schmider, Ziegler, Danay, Beyer & Bühner, 2010).

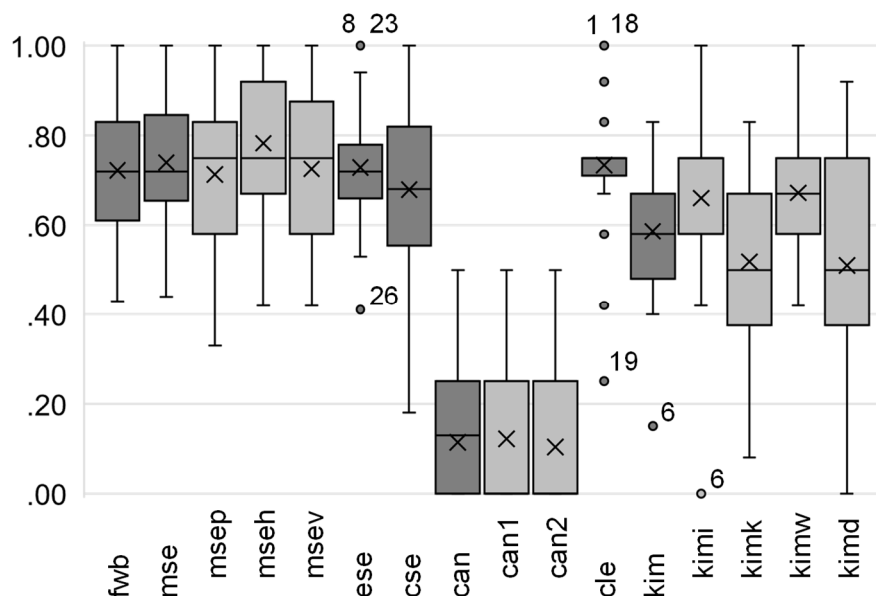
Personenfähigkeiten

Die innerhalb der IRT geschätzte Personenfähigkeit θ im *Fachwissen zur Brechung* (fwb) basiert nicht nur auf der Anzahl der richtig gelösten Aufgaben, sondern auch darauf, welche Aufgaben richtig oder falsch gelöst wurden. Da in der Theorie für die beiden Fälle (a) *keine Aufgabe richtig gelöst* und (b) *alle Aufgaben richtig gelöst* keine Schätzung der Personenfähigkeit möglich ist, müssen die Grenzwerte anders berechnet werden. Die minimale Personenfähigkeit ergibt sich aus einem Testergebnis, bei dem alle Aufgaben bis auf die mit der geringsten Schwierigkeit nicht richtig gelöst wurden (fwb5 zur Geradlinigkeit der Lichtausbreitung vor und nach der Brechung, $\theta_{\min} = -4.82$).³⁸ Die maximale Personenfähigkeit ergibt sich aus einem bis auf die schwerste Aufgabe komplett richtig gelösten Test (fwb15 zum Zusammenhang von Einfallswinkel und Brechungswinkel, $\theta_{\max} = 8.33$, zu 1 umkodiert). Diese maximale Schätzung wird auch zwei Personen zugeschrieben, die den Test vollständig richtig beantwortet haben ($\theta_{10} = \theta_{26} = \theta_{\max}$). Das schlechteste Testergebnis der Stichprobe liegt allerdings mit 7 von 18 richtig gelösten Aufgaben weit über dem theoretischen Minimum ($\theta_{19} = .86$, zu 0 umkodiert).

Verteilungen

Die Verteilungen der quantitativ erhobenen Daten können den Boxplots in Abbildung 28 entnommen werden. Die Subskalen haben eine eingerückte Bezeichnung und ihre Boxen sind hellgrau gefüllt. Auffällig sind zunächst die besonders schmalen Verteilungen der *experimentierbezogenen SWE* (ese) und der Skala *Computer beim Lernen* (cle) mit einigen annähernd symmetrisch verteilten Ausreißern. Die Zahlen neben den äußersten Werten geben die ID der jeweiligen Personen an. Das deutet auf ein (bis auf einzelne Ausnahmen) eher homogenes Antwortverhalten rund um den mit einem Kreuz markierten Mittelwert hin. Im Gegensatz dazu weisen die *computerbezogene SWE* (cse), die *wahrgenommene Kompetenz* (kimk) und die Skala *Druck/Anspannung* (kimd) eine breite Verteilung auf. Die Teilnehmenden nutzen somit alle Antwortmöglichkeiten und stimmen den Aussagen nicht nur zu, sondern lehnen sie auch teilweise ab. Weiterhin sind

³⁸ Im Gegensatz zur KTT bedeutet innerhalb der IRT eine geringe Schwierigkeit, dass die Aufgabe leicht ist und von den meisten Personen richtig gelöst wird.



Anmerkung. Der Median ist mit einer Linie und der Mittelwert mit einem Kreuz markiert.

Abbildung 28: Boxplots der umkodierte quantitativ erhobene Variablen ($N = 41$).

die stark linkssteilen Angaben zur *Computerangst* (can, can1 und can2 mit vorwiegend niedrigen Werten) auffällig. Das ist ein Hinweis darauf, dass die Aussagen zu drastisch formuliert sind, sodass eine Zustimmung nur bei sehr hohen Ausprägungen des Merkmals wahrscheinlich sind und in der vorliegenden Stichprobe größtenteils auf deutliche Ablehnung stoßen. Eine adäquate Abgrenzung zwischen einer nichtvorhandenen oder schwachen Computerangst ist dadurch nicht möglich (Bodeneffekt).

Schließlich ist ein Extremwert bei der Subskala *Interesse/Vergnügen* (kimi) auffällig, der sich auch auf die übergeordnete Skala der *intrinsischen Motivation* (kim) niederschlägt. Die starke Ablehnung aller Aussagen der Subskala steht im Widerspruch zu den Angaben der restlichen Teilnehmenden und kann im Folgenden insbesondere die Ergebnisse von Zusammenhangsanalysen außerordentlich beeinflussen. Ein möglicher Ausschluss wird im Einzelfall geprüft und bei Bedarf gesondert berichtet.

4 Dynamische Modelle im Praktikum der Optik

Mittelwerte

Die geschätzten Fähigkeitswerte deuten auf ein im Durchschnitt hohes *Fachwissen zur Brechung* hin (*fwb*, $M = .72$, $SD = .14$).³⁹ Das ist insofern erwartbar, da die Aufgaben Schulwissen abfragen, das in den Klassenstufen 7 bzw. 8 unterrichtet wird und in der Vorlesung behandelt wurde. Die unterschiedlichen *SWE* der Studierenden fallen ebenfalls hoch aus (*mse*, $M = .74$, $SD = .14$; *ese*, $M = .73$, $SD = .12$; *cse*, $M = .68$, $SD = .20$). Bei den Subskalen der *mathematischen SWE* erreicht *Handwerk* den höchsten Wert (*mseh*, $M = .78$, $SD = .15$). *Visualisierung* und *Prozessfähigkeit* fallen etwas niedriger aus (*msev*, $M = .73$, $SD = .18$; *msep*, $M = .71$, $SD = .16$). Dieser Unterschied ist insofern erwartbar, da mit einer höheren *Prozessfähigkeit* die eigenständige Lösung komplexer mathematischer Probleme einhergeht, während zum *Handwerk* z. B. die mathematische Grundfertigkeit der Termumformung zählt, die sich die meisten Studierenden eher zutrauen.

Was die *Computerangst* der Studierenden betrifft, so sind die Mittelwerte für die beiden Aussagen sehr niedrig, wobei die generelle Aussage *Computer machen mir Angst* eine etwas höhere Zustimmung erfährt als die Befürchtung, den Computer durch eigene Handlungen zu beschädigen (*can1*, $M = .12$, $SD = .18$; *can2*, $M = .10$, $SD = .15$). Der hohe Wert auf der Skala *Computer beim Lernen* zeugt hingegen von einer im Durchschnitt positiven Einstellung zum Lernen mit dem Computer (*cle*, $M = .73$, $SD = .13$).

Die erhobene *intrinsische Motivation* der Studierenden, was die Arbeit mit dem Modell angeht, kann insgesamt als mittelmäßig bis hoch eingeschätzt werden (*kim*, $M = .59$, $SD = .13$). Dabei fallen die Subskalen *Interesse/Vergnügen* und *wahrgenommene Wahlfreiheit* (*kimi*, $M = .66$, $SD = .18$, *kimw*, $M = .67$, $SD = .14$) höher aus als *wahrgenommene Kompetenz* und *Druck/Anspannung* (*kimk*, $M = .52$, $SD = .18$; *kimd*, $M = .51$, $SD = .23$). Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Studierenden die Arbeit mit dem dynamischen Modell im Durchschnitt interessant fanden und die angebotene Freiheit, ihr Vorgehen eigenständig zu wählen, erkannten. Allerdings sind sie mit ihren eigenen Handlungen nicht vollumfänglich zufrieden und haben diesbezüglich auch Druck verspürt. Eine tiefergehende Beurteilung der intrinsischen Motivation während der Arbeit mit einem

³⁹ Die verbale Einschätzung von relativen Werten basiert auf einer selbstgewählten Skala: bis .19 sehr niedrig, ab .20 bis .39 niedrig, ab .40 bis .59 mittelmäßig, ab .60 bis .79 hoch und ab .80 sehr hoch.

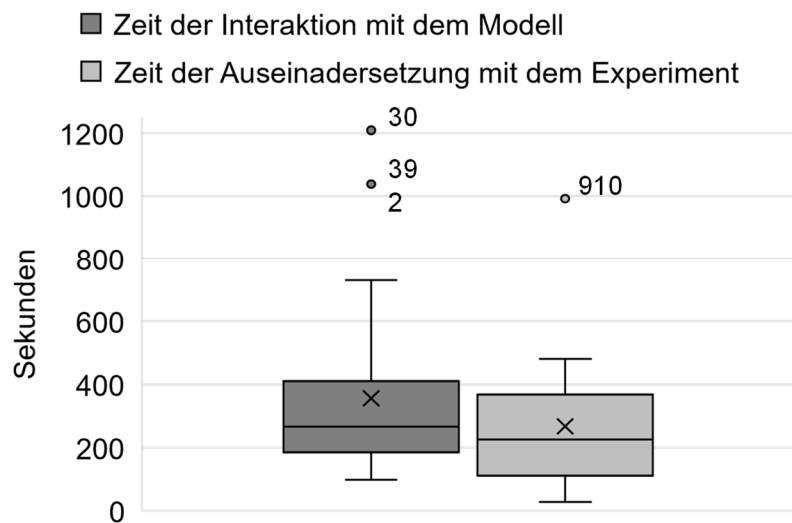


Abbildung 29: Boxplots der gemessenen Zeiten der Interaktion mit dem Modell und der Auseinandersetzung mit dem Experiment ($N = 20$).

dynamischen Modell ist mithilfe der qualitativ erfassten Aspekte möglich (siehe Abschnitt „Motivationsaspekte“ in Kapitel 4.4.2).

Zeiten

Zu den quantitativ erhobenen Merkmalen gehört auch die Zeit für die Interaktion mit dem Modell bzw. für die Auseinandersetzung mit dem Experiment, die in Sekunden angegeben wird. Bei dem Modell handelt es sich um individuelle Arbeitsphasen ($N = 41$) und bei dem Experiment um Zeitangaben pro Gruppe ($N = 20$).⁴⁰ Anhand der Boxplots in Abbildung 29 ist zu erkennen, dass die Verteilung der Zeit für das Modell rechtsschief ist im Vergleich zum Experiment. Einige Personen verbringen somit etwas mehr Zeit mit dem Modell als der überwiegende Rest der Stichprobe. Die Verteilung der Zeiten für das Experiment fällt hingegen annähernd symmetrisch aus. Für beide Phasen liegen außerdem Ausreißer vor, die weit über der Zeit liegen, die im Mittel für die Beschäftigung mit den digitalen oder realen Materialien benötigt wird. Wie im Abschnitt „Zeit mit dem Modell“ in Kapitel 4.3.3 bereits erwähnt, kann nicht ausgeschlossen werden, dass es sich zumindest bei den Ausreißern mit den Nummern 30 und 39 auch um systematische Fehler handelt, da es sein kann, dass das Fenster mit dem Modell eine längere Zeit auch ohne Interaktion geöffnet war (automatische Zeiterfassung ohne Videoaufnahme). Aus den Videoaufnahmen des Experiments geht jedoch hervor,

⁴⁰ Im Folgenden werden nur von $N = 41$ abweichende Stichprobengrößen angegeben.

4 Dynamische Modelle im Praktikum der Optik

dass die Gruppe bestehend aus den Teilnehmenden mit den Nummern 9 und 10 sich außerordentlich ausgiebig mit den Materialien auseinandergesetzt und viele Situationen diskutiert hat. Der Umgang mit diesen Werten wird im Zuge der entsprechenden Zusammenhangsanalysen diskutiert. Was die Mittelwerte der beiden Phasen angeht, ist zu erkennen, dass im Durchschnitt mehr Zeit mit dem Modell verbracht wird (mze in s, $M = 355$, $SD = 258$, ca. 6 min) als mit dem ähnlich gestalteten Experiment (eze in s, $M = 267$, $SD = 226$, ca. 4,5 min). Hierbei ist jedoch der Wechsel der Sozialform von Einzel- zur Gruppenarbeit zu beachten. Anhand der Standardabweichungen lässt sich erkennen, dass die Streuung in beiden Phasen groß ist. Die Werte erstrecken sich von sehr kurzen Zeitspannen ($mze_{\min} = 97$, $eze_{\min} = 28$), bei denen die Frage aufkommt, inwiefern diese Teile des Praktikums ernsthaft bearbeitet wurden, bis hin zu außerordentlich langen (ggf. nicht durchgehenden) Arbeitsphasen ($mze_{\max} = 1209$, $eze_{\max} = 992$). Es lässt sich festhalten, dass bei fehlenden Zeitvorgaben die individuelle Interaktion mit dem Modell und auch die Auseinandersetzung mit dem Experiment von Person zu Person bzw. von Gruppe zu Gruppe zeitlich stark abweichen kann. Diese Beobachtung führt zu der Fragestellung, welche lernbezogenen Merkmale mit dem Wunsch zusammenhängen, sich länger oder kürzer mit den Materialien auseinanderzusetzen.

4.4.2 Qualitativ erfassten Merkmale

Die Ausprägung der qualitativ erfassten Merkmale kann anhand der Häufigkeitswerte in Tabelle 49 im Anhang eingeordnet werden. Es handelt sich zum einen um die im Modell und Experiment erreichten Ziele und die nach der Arbeit mit dem Modell formulierten Hypothesen. Sie verteilen sich auf Kategorien bzw. Stufen (Klassen) mit einer unterschiedlichen Anzahl an Zielen bzw. Hypothesen (Klassenbreiten d), sodass absolute und relative Häufigkeitsdichten (H_d und h_d) berechnet werden, die auf die Klassenbreite bezogene Klassenhäufigkeiten angeben. Hinzu kommen die analysierten Gründe für die Zustimmung oder Ablehnung der Aussagen zur intrinsischen Motivation.

Ziele des Modells

Von den 14 möglichen *Zielen des Modells* werden im Durchschnitt rund die Hälfte erreicht (mzi , $h_d = .49$). Das gilt jedoch nicht für die Häufigkeitswerte der einzelnen Kategorien. Von den sechs verfügbaren Bestandteilen des Modells werden rund zwei Drittel variiert ($mVar$, $h_d = .67$). Von den vier möglichen Grenzen des

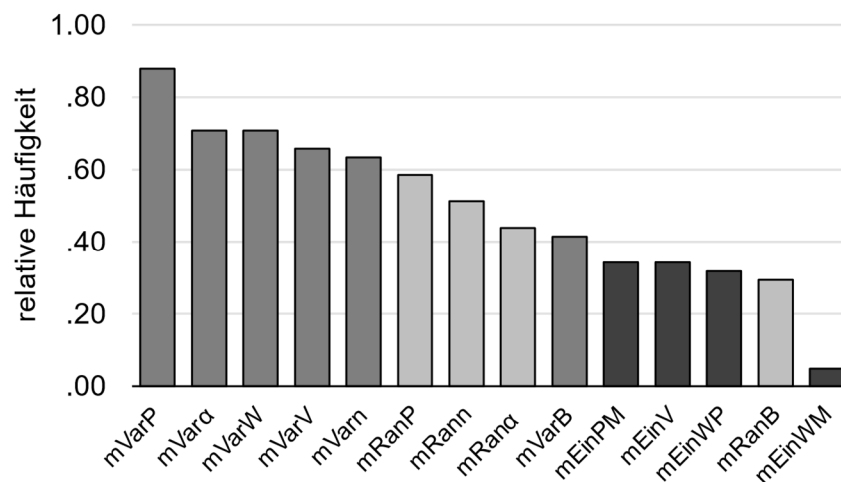


Abbildung 30: Absteigend sortiertes Säulendiagramm der relativen Häufigkeiten erreichter Ziele des Modells

Modells werden rund die Hälfte untersucht (mRan, $h_d = .46$). Von den vier möglichen experimentiergezogenen Einstellungen werden weniger als ein Drittel vorgenommen (mEin, $h_d = .26$). In Abbildung 30 sind die relativen Häufigkeiten der einzelnen Ziele in einem Säulendiagramm dargestellt. Der Anteil der Personen, die den Eintrittspunkt P im Modell verändert haben (mVar $_P$), ist zwar sehr hoch, andererseits gibt es offensichtlich Teilnehmende, die der direkten Aufforderung, P und andere Bestandteile des Modells zu variieren (siehe Kapitel 4.3.3), in der Lernsituation nicht nachgekommen sind. Die Werte für die Variation der restlichen Bestandteile (mVar, grau) sind bis auf die Änderung der Größe der Halbkreisscheibe hoch (mVar $_B$). Die verschiedenen Randbereiche werden rund von der Hälfte der Teilnehmenden untersucht (mRan, hellgrau), was wiederum nicht für die Größe der Halbkreisscheibe gilt (mRan $_B$). Der Anteil der vorgenommenen messbezogenen Einstellungen ist insgesamt niedrig (mEin, dunkelgrau), wobei zwei Personen (5 % der Stichprobe) versucht haben, Winkel- und Halbkreisscheibe mittig auszurichten (mEin $_{WM}$). Die Abnahme der relativen Häufigkeiten lässt sich mit der Zunahme der Komplexität und des notwendigen Zielbewusstseins der drei Zielkategorien (a) *Bestandteile variieren*, (b) *Randbereiche untersuchen* und (c) *messbezogene Einstellungen vornehmen* erklären. Die Ausnahme, die für die Ziele im Zusammenhang mit der Größe der Halbkreisscheibe beobachtet werden kann, bestätigt dabei die Regel, denn diese Variable spielt für den physikalischen Hintergrund des dynamischen Modells die geringste Rolle.

Faktoren der Arbeit mit dem Modell

Die von den Teilnehmenden im Modell erreichten Ziele stellen interkorrelierte Variablen dar, vor allem da die Untersuchung der Randbereiche oder die Einstellung bestimmter Konfigurationen die Variation der entsprechenden Bestandteile des Modells voraussetzen. Es bietet sich deshalb an, die in diesen Variablen enthaltene Information explorativ durch eine geringere Anzahl an Variablen auszudrücken. Dafür bietet sich eine Hauptkomponentenanalyse an, die einen Großteil der Varianz des ursprünglichen Datensatzes durch einige unabhängige Komponenten erklärt.⁴¹

Die Überprüfung des Kaiser-Meyer-Olkin-Kriteriums ($KMO > .50$) ist ein Standardverfahren, um zu entscheiden, ob die Antwortmuster eine Zusammenfassung der Variablen zu Faktoren rechtfertigen (Cleff, 2015a, S. 220). Die Überprüfung über alle Ziele hinweg liefert kein akzeptables Ergebnis ($KMO = .46$). Deshalb wurde das Maß der Stichprobeneignung ($MSA > .50$) der einzelnen Ziele betrachtet. Im ersten Schritt wurde das Modellziel Ein_V ausgeschlossen ($MSA = .30$), im zweiten das Ziel Ein_{WM} ($MSA = .38$). In der Folge weisen die restlichen Ziele ein akzeptables Maß der Stichprobeneignung auf. Sowohl der Bartlett-Test ($Chi\text{-}Quadrat(66) = 195.82, p < .001$) als auch das Kaiser-Meyer-Olkin-Kriterium ($KMO = .61$) zeigen, dass sich die restlichen Variablen für eine Faktoranalyse eignen. Die Hauptkomponentenanalyse wird mit Varimax-Rotation durchgeführt und obwohl vier Faktoren einen Eigenwert größer als 1.0 aufweisen, liegen aufgrund des Knicks im Screeplot beim vierten Faktor eher drei Faktoren vor (siehe Abbildung 31), die 63 % der Varianz erklären. Inhaltlich lassen sich die Faktoren als Gruppen von Zielen interpretieren, die gemeinsam verfolgt bzw. erreicht werden.

Die rotierte Komponentenmatrix zeigt die Faktorladungen der zwölf Ziele auf die drei Faktoren (siehe Tabelle 13, links). In der Regel werden Variablen einem Faktor zugeordnet, deren Faktorladungen $> .50$ sind (Cleff, 2015a, S. 225). Obwohl keine Mehrfachladungen im engeren Sinne vorliegen, werden auch Ziele mit Faktorladungen $> .30$ in die Interpretation aufgenommen. Der erste Faktor zeichnet

⁴¹ Anstelle von Komponenten wird im Folgenden wie üblich von Faktoren gesprochen, da die Hauptkomponentenanalyse eine Form der Faktorenanalyse darstellt, bei der es allerdings nicht darum geht, latente Variablen aus einem Datensatz zu extrahieren. Dafür eignen sich andere Extraktionsverfahren wie z. B. die Hauptachsenanalyse. Bei der Hauptkomponentenanalyse erfolgt stattdessen eine Zusammenfassung der Ziele zu Faktoren unter der Maßgabe, möglichst wenig Information zu verlieren (Cleff, 2015a, S. 222).

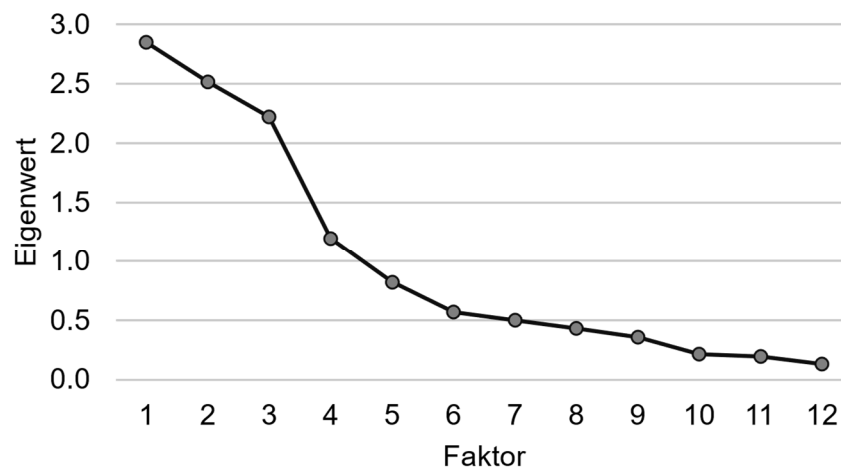


Abbildung 31: Screeplot der Hauptkomponentenanalyse der zwölf Ziele des Modells

sich dadurch aus, dass Kontrollkästchen betätigt werden, um zuvor ausgeblendete Bestandteile des Modells einzublenden (Winkelscheibe und Verlängerung). Außerdem wird die Größe der Halbkreisscheibe über den Punkt B angepasst, die jedoch keinen Einfluss auf die physikalischen Eigenschaften des Systems hat. Der zweite Faktor wird von der Veränderung des Brechungsindex mithilfe des Schiebereglers dominiert, der die Stärke der Brechung beim Ein- und Austritt beeinflusst. Kennzeichnend für diesen Faktor ist noch, dass in diesem Fall der Eintrittspunkt P seltener verschoben wird und anscheinend auch keine unnötige Anpassung der Größe der Halbkreisscheibe erfolgt. Der dritte Faktor enthält hingegen die Ziele, die dem Zweck des Modells entsprechen. Es handelt sich einerseits um die Veränderung des Einfallswinkels α und andererseits um die Untersuchung des Lichtwegs anhand der möglichen Eintrittspunkte P bis in den Randbereich hinein. Folgerichtig gehört zu diesem Faktor auch die wichtige Einstellung, bei der das Licht durch die Mitte des Halbkreiskörpers verläuft und beim Austritt nicht gebrochen wird. Hinzu kommt, dass die eingestellten Winkel mit der Winkelscheibe gemessen werden. Allerdings gibt es für dieses Ziel auch auf andere Faktoren Ladungen, die etwas schwächer ausfallen.

Zusammenfassend lassen sich die drei Faktoren charakterisieren als (a) *Anpassung der Oberfläche* des Modells (aom, Faktor 1), (b) *Veränderung der Eigenschaften* einzelner Bestandteile des Modells (vem, Faktor 2) und (c) *Untersuchung des Systems*, das im Modell verankert wurde (usm, Faktor 3). Es lässt sich darüber hinaus eine qualitative Abstufung von einem eher oberflächlichen (Faktor 1) über einen einseitigen (Faktor 2) und schließlich zu einem tiefgründigen

4 Dynamische Modelle im Praktikum der Optik

Umgang mit dem dynamischen Modell vornehmen (Faktor 3). Die Hauptkomponentenanalyse deckt nicht nur die im Datensatz vorliegenden Strukturen auf. Darüber hinaus können auch einzelne Teilnehmende hinsichtlich der Faktoren unterschieden werden. Dazu werden mithilfe der Koeffizientenmatrix in Tabelle 13 (rechts) standardisierte Faktorwerte berechnet (aom , vem , usm , $M = 0$, $SD = 1$). Sie bilden die Bewertung der einzelnen Personen für jeden Faktor in Relation zum Durchschnittswert der Stichprobe (Cleff, 2015a, S. 228).

Ziele des Experiments

Da die Durchführung des Experiments im Gegensatz zu der Arbeit mit dem Modell in Gruppen stattfand, beziehen sich die folgenden Ergebnisse auf Werte, die pro Gruppe erfasst wurden ($N = 20$) und in Tabelle 50 im Anhang berichtet werden. Für den Vergleich zwischen Modell und Experiment werden für die entsprechenden Ziele des Modells Durchschnittswerte pro Gruppe berechnet.

Von den neun konsistent zu erfassenden *Zielen des Experiments* werden im Durchschnitt ungefähr zwei Drittel erreicht (ezi , $h_d = .61$). Das gilt auch für die Häufigkeitswerte der Kategorien *Bestandteile des Experiments variieren* ($eVar$,

Tabelle 13: Rotierte Komponentenmatrix (links) und Koeffizientenmatrix (rechts) der zwölf Ziele des Modells

| Ziel | Komponente | | | Komponente | | |
|--------------------|------------|-------------|------------|------------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| mVar _W | .81 | . | . | .32 | .09 | -.06 |
| mVar _V | .81 | . | . | .32 | .09 | -.03 |
| mVar _B | .72 | -.45 | . | .27 | -.16 | .05 |
| mRan _B | .68 | -.41 | . | .26 | -.15 | -.01 |
| mRan _n | . | .84 | . | .05 | .34 | .08 |
| mVar _n | . | .81 | . | -.01 | .33 | .05 |
| mVar _P | . | -.60 | .40 | -.01 | -.22 | .14 |
| mVar _α | . | . | .82 | .01 | .02 | .33 |
| mRan _α | . | . | .75 | -.11 | .09 | .32 |
| mEin _{PM} | . | . | .61 | .00 | .01 | .25 |
| mRan _P | . | -.42 | .60 | -.02 | -.14 | .23 |
| mEin _{WP} | .43 | .37 | .53 | .17 | .18 | .23 |

Anmerkung. Faktorladungen (links) mit einem Betrag von $< .30$ sind nicht enthalten und $> .50$ fett gedruckt.

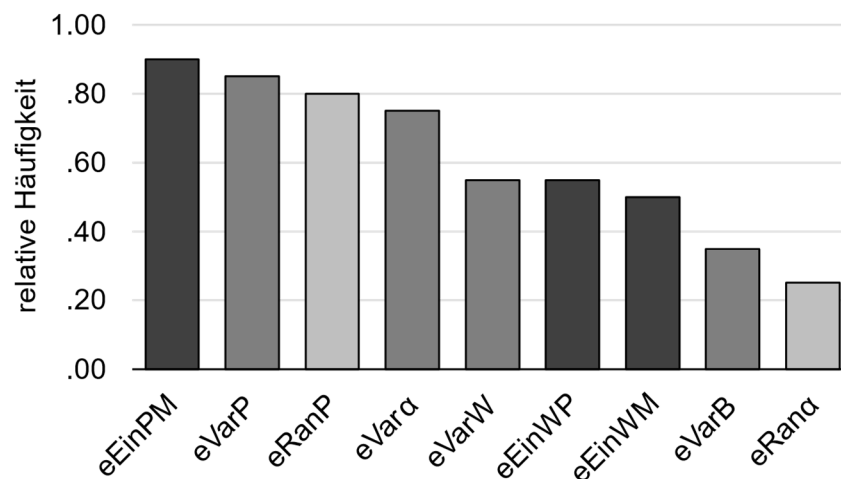
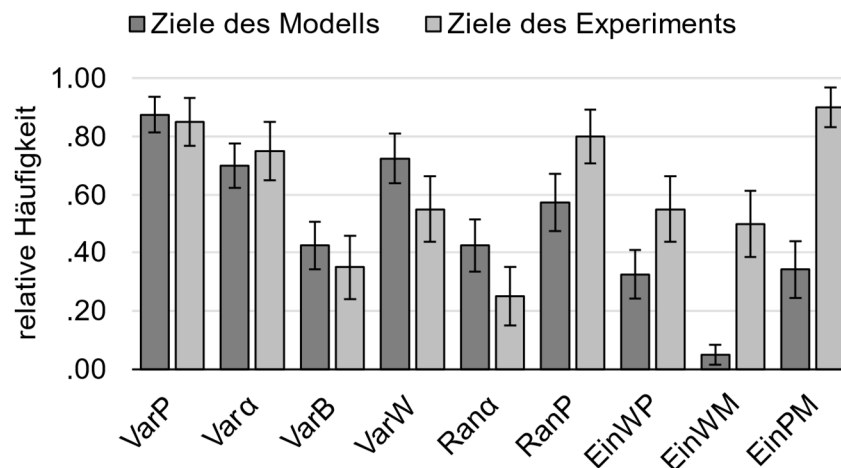


Abbildung 32: Absteigend sortiertes Säulendiagramm der relativen Häufigkeiten erreichter Ziele des Experiments

$h_d = .63$) und *messbezogene Einstellungen vornehmen* (eEin, $h_d = .65$). Der Anteil der vorgenommenen Einstellungen hat sich im Vergleich zum Modell somit mehr als verdoppelt (mEin, $h_d = .24$). Das lässt sich dadurch erklären, dass die Materialien im Laufe der Experimentierphase nach einer anfänglichen Untersuchung des Lichtwegs durch die Halbkreisscheibe in vielen Fällen zu der fertigen Messanordnung zusammengesetzt worden sind. Von den zwei möglichen Grenzen des Experiments wird im Durchschnitt nur eine untersucht (eRan, $h_d = .53$).

In Abbildung 32 sind die relativen Häufigkeiten der einzelnen Ziele in einem Säulendiagramm dargestellt. Ein sehr hoher Anteil der Studierenden hat während des Experiments die Mitte der Halbkreisscheibe mit dem Laser anvisiert (eEin_{PM}). Das gilt auch für die Variation der Eintrittsstelle des Lichts und die Untersuchung der Ränder der Halbkreisscheibe (eVar_P und eRan_P). Die Variation weist einen geringeren Anteil auf als die Einstellung. Das deutet darauf hin, dass einige Gruppen gleich zu Beginn den Laser auf die Mitte gerichtet und danach keine wesentliche Variation der Eintrittsstelle mehr vorgenommen haben (genau genommen handelt es sich um zwei Gruppen mit den IDs 13 und 14 sowie 27 und 28). Der Anteil der Gruppen, die verschiedene Einfallswinkel eingestellt haben (eVar α), ist hoch, die restlichen Ziele erreichen mittelmäßige bis niedrige Werte. Die ersteren betreffen den Umgang mit der Winkelscheibe (eVar_W, eEin_{WP} und eEin_{WM}). Bei den letzteren handelt es sich um die Variation der Halbkreisscheibe von groß auf klein oder umgekehrt (eVar_B) sowie die Einstellung von besonders großen Einfallswinkeln (eRan α).

4 Dynamische Modelle im Praktikum der Optik



Anmerkung. Die Fehlerbalken entsprechen dem Standardfehler der relativen Häufigkeit.

Abbildung 33: Nach Differenzen aufsteigend sortiertes Säulendiagramm der relativen Häufigkeiten erreichter Ziele des Modells und Experiments

Während beim Modell einzelne Zielkategorien (Var, Ran, Ein) deutliche Unterschiede in ihren Häufigkeiten aufgewiesen haben, lässt sich diese Tendenz bei den Zielen des Experiments nicht beobachten. Stattdessen wird deutlich, dass einige Ziele, die im Modell und im Experiment erreicht werden können, sich in ihren Häufigkeiten unterscheiden, während andere ungefähr gleich oft im Modell und Experiment vorkommen (siehe Abbildung 33). Die kleinsten Unterschiede können bei der Variation der Bestandteile beobachtet werden (Var_P bis Var_W). Danach wird deutlich, dass große Einfallswinkel eher im Modell eingestellt wurden (Ran_α), während im Experiment eher die Eintrittsstellen abseits der Mitte untersucht wurden (Ran_P). Diese Beobachtung kann zum einen dadurch erklärt werden, dass im Experiment die Totalreflexion in den Randbereichen der Halbkreisscheibe sichtbar ist und im Modell ausgeblendet wurde. Viele Gruppen haben sich nach der zufälligen Beobachtung genauer mit diesem – zumindest für die nachfolgende Messung der Brechungswinkel zur Überprüfung des Brechungsgesetzes – eher nebensächlichen Phänomen beschäftigt. Mit dem Modell konnte somit die Aufmerksamkeit auf andere Ziele – wie z. B. die Einstellung verschiedener Einfallswinkel – gelenkt werden. Die größten Unterschiede können jedoch bei den messbezogenen Einstellungen beobachtet werden, die im Experiment häufiger vorgenommen wurden. Obwohl die Winkelscheibe im Experiment etwas seltener in den offenen Untersuchungsprozess der Lichtwege durch die

Halbkreisscheibe einbezogen wird (Var_W), wird sie deutlich öfter korrekt angewendet (Ein_{WP} und Ein_{WM}). Insbesondere wird im Experiment fast schon intuitiv die Halbkreisscheibe in die Mitte der Winkelscheibe gelegt, während im Modell dieses Verhalten kaum beobachtet werden konnte. Ob dieser Unterschied damit zusammenhängt, dass im Experiment üblicherweise die Halbkreisscheibe mit der Hand bewegt und im Modell die Winkelscheibe mit der Maus gezogen wird, lässt sich nur vermuten. Eine weitere Erklärung liegt in der bereits erwähnten Bestrebung mancher Gruppen, die Experimentieranordnung für die anschließende Messung in der nächsten Phase des Experiments vorzubereiten. Die Ergebnisse könnten anders aussehen, bestünde während der Arbeit mit dem Modell zusätzlich die Aufforderung, bestimmte Einfallswinkel einzustellen und die dazugehörigen Brechungswinkel zu messen und zu notieren (größerer Fokus auf das Modell als Simulation der Messung siehe Kapitel 3.1.4). Schließlich erfährt die Einstellung, bei der das Licht durch die Mitte der Halbkreisscheibe geschickt wird, den größten Zuwachs an Häufigkeit (Ein_{PM}). Hierbei gilt es zu beachten, dass die im Modell vorgegebene Ausgangssituation die bewusste Verschiebung des Punktes P in die Mitte erfordert. Im Experiment werden Laser und Halbkreisscheibe zuerst eigenständig auf dem Tisch positioniert. Der Laser wird danach in die Richtung der Halbkreisscheibe gerichtet und angeschaltet. Dabei wird manchmal gleich die Mitte anvisiert. Ob diese Einstellung im Experiment in diesem Fall bewusst erfolgt, um nur die Brechung beim Eintritt zu beobachten, lässt sich anhand des Videomaterials nur schwer nachvollziehen. In vielen Fällen wird die Mitte jedoch bewusst gesucht, um diese Einstellung zu erzielen. Ob die erfassten Unterschiede eine Signifikanz und welche Effektstärke sie aufweisen, lässt sich den Ergebnissen der t-Tests in der Tabelle 51 im Anhang entnehmen.⁴²

Faktoren des Experimentierens

Für die neun Ziele, die im Experiment erreicht werden können, wurde ebenfalls eine Hauptkomponentenanalyse mit Varimax-Rotation durchgeführt. Sowohl der Bartlett-Test ($Chi\text{-}Quadrat(36) = 76.52, p < .001$) als auch das Kaiser-Meyer-Olkin-Kriterium ($KMO = .58$) zeigen trotz der kleinen Stichprobengröße von 20 Gruppen, dass sich die Variablen für eine Faktoranalyse eignen. Es konnten drei

⁴² Aufgrund der Stichprobengröße wurden auch nicht-parametrische Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests für verbundene Stichproben gerechnet, die allerdings zu demselben Ergebnis führen: Signifikante Unterschiede bei den Zielen Ran_P ($z = -2.01, p = .045, r = .45$), Ein_{WM} ($z = -2.98, p = .003, r = .66$) und Ein_{PM} ($z = -2.98, p = .003, r = .67$) mit ähnlich großen Effekten.

4 Dynamische Modelle im Praktikum der Optik

Faktoren extrahiert werden, die 70 % der Varianz erklären. Die rotierte Komponentenmatrix zeigt hohe Faktorladungen der neun Ziele auf drei Faktoren (siehe Tabelle 14, links). Der erste Faktor zeichnet sich dadurch aus, dass die notwendigen Vorkehrungen für eine saubere Messung des Brechungswinkels getroffen werden: Die Winkelscheibe wird in den Experimentierprozess eingezogen ($eVar_W$), die Halbkreisscheibe wird darauf mittig platziert ($eEin_{WM}$) und der Laser wird in die Mitte der Winkelscheibe gerichtet ($eEin_{WP}$). Der zweite Faktor umfasst die experimentellen Handlungen, die zur Beobachtung der Lichtbrechung beim Eintritt in Abhängigkeit von verschiedenen Einfallswinkeln notwendig sind: Die Laser wird auf die Mitte der Halbkreisscheibe gerichtet ($eEin_{PM}$), wobei kleine und große Einfallswinkel eingestellt werden können ($eVar_\alpha$ und $eRan_\alpha$). Der dritte Faktor betrifft dagegen die Untersuchung des Lichtwegs an sich mit verschiedenen Eintrittsstellen ($eRan_P$ und $eVar_P$) und Halbkreiskörpern ($eVar_B$).

Die aus dem Verhalten der Gruppen im Experiment extrahierten Faktoren können charakterisiert werden als (a) *Vorbereitung der Messung* (vme , Faktor 1), (b) *Durchführung der Messung* (dme , Faktor 2) und (c) *Untersuchung des Systems* (use , Faktor 3). Es gibt damit eine Verhaltensweise, die sowohl im Modell als auch im Experiment beobachtet werden kann (usm und use). Die anderen Faktoren repräsentieren Verhaltensweisen, die für die entsprechende Medienart spe-

Tabelle 14: Rotierte Komponentenmatrix (links) und Koeffizientenmatrix (rechts) der neun Ziele des Experiments

| Ziel | Komponente | | | Komponente | | |
|---------------|------------|-----|-----|------------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| $eEin_{WP}$ | .94 | . | . | .35 | .01 | .03 |
| $eEin_{WM}$ | .93 | . | . | .36 | -.03 | -.02 |
| $eVar_W$ | .89 | . | . | .37 | -.17 | -.04 |
| $eEin_{PM}$ | . | .84 | . | -.03 | .47 | .00 |
| $eVar_\alpha$ | . | .80 | . | .00 | .44 | -.02 |
| $eRan_\alpha$ | . | .56 | . | -.12 | .35 | -.02 |
| $eRan_P$ | . | . | .82 | .01 | -.08 | .46 |
| $eVar_P$ | . | . | .79 | -.03 | .14 | .44 |
| $eVar_B$ | . | . | .70 | -.02 | -.06 | .39 |

Anmerkung. Faktorladungen (links) mit einem Betrag von $< .30$ sind nicht enthalten.

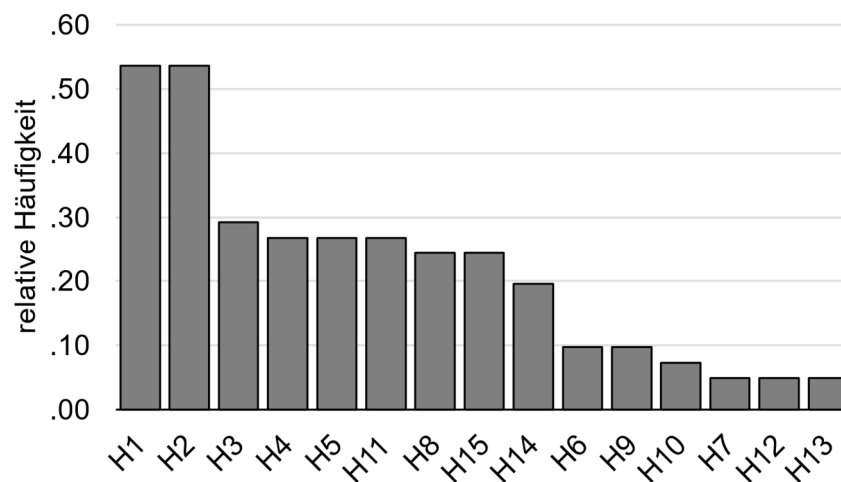


Abbildung 34: Absteigend sortiertes Säulendiagramm der relativen Häufigkeiten kodierter Hypothesen

zifisch sind. Mit den in Tabelle 14 (rechts) angegebenen Koeffizienten können einzelne Personen wiederum hinsichtlich der während der Experimentierphase verfolgten Ziele unterschieden werden.

Hypothesen und Kernhypothesen

Mithilfe des Kategoriensystems aus 15 Hypothesen konnten 134 Aussagen in der Stichprobe kodiert werden (siehe Tabelle 40 und Tabelle 41 im Anhang). Es gibt im Durchschnitt fast neun Aussagen pro Kategorie oder etwas mehr als drei Aussagen pro Person. Die Spannweite für diesen Wert beträgt acht Aussagen mit null als Minimum und acht als Maximum. Es können auch pro Kategorie große Unterschiede in den relativen Häufigkeiten beobachtet werden (siehe Abbildung 34). Am häufigsten (von etwas mehr als der Hälfte der Personen) wird das Phänomen der Brechung beschrieben, welches in der Regel sowohl beim Eintritt als auch beim Austritt beobachtet werden kann (H1 und H2). Die restlichen Aussagen werden von weniger als einem Drittel der Teilnehmenden formuliert. Dazu gehören auch die Aussagen zur Richtung der Brechung beim Ein- und Austritt (H3 und H4). Vom Ende aus betrachtet, kommen vier Kategorien mit einer relativen Häufigkeit von unter 10 % sehr selten vor und stellen vereinzelte Meinungen dar (H10, H7, H12 und H13). Sie werden insbesondere bei Zusammenhangsanalysen mit anderen Merkmalen nicht weiter betrachtet. Auf der anderen Seite gibt es bei den übrigen Aussagen inhaltliche Überschneidungen, sodass eine Zusammenfassung der einzelnen Aussagen zu *Kernhypothesen* angemessen erscheint

4 Dynamische Modelle im Praktikum der Optik

(siehe Tabelle 15).⁴³ Für die Kernhypothesen werden bei mehr als einer Kategorie relative Häufigkeitsdichten berechnet, die zusammen mit den restlichen Häufigkeitswerten der Tabelle 52 im Anhang entnommen werden können. Den höchsten Wert erreichen bei solchen Kernhypothesen nur Personen, die alle Teilaussagen getroffen haben. Die generellen Aussagen zur Brechung werden wiederum am häufigsten genannt (KH1, $h_d = .35$). Den Einfluss des Brechungsindex beschreiben etwas weniger Personen (KH2, $h_d = .27$). Rund ein Viertel spricht von der Situation, in der kein Licht die Halbkreisscheibe verlässt (Totalreflexion, KH5, $h_d = .24$), dicht gefolgt von den Ergebnissen der Untersuchung des Lichtwegs (KH4, $h_d = .23$). Schließlich geht ein kleinerer Teil der Teilnehmenden auch auf die Frage ein, wann das Licht überhaupt keine Brechung erfährt (KH3, $h_d = .17$).

Tabelle 15: Inhaltliche Zusammenfassung der elf Hypothesenkategorien zu fünf Kernhypothesen

| Kategorien Kernhypothese | Name |
|----------------------------|---|
| H1 H2 H3 H4 H6 | Licht breitet sich geradlinig aus und wird beim Übergang von einem optisch dünneren in ein optisch dichteres Medium zum Lot hin gebrochen. Danach breitet es sich wieder geradlinig aus, bis es beim Übergang vom optisch dichteren in das optisch dünnere Medium vom Lot weg gebrochen wird. |
| H5 | Wie stark das Licht beim Übergang von einem Medium in das andere gebrochen wird, hängt von dem Verhältnis der Brechungsindizes der Medien ab. |
| H8 H9 | Licht, das senkrecht auf eine Grenzfläche trifft, wird beim Eintritt nicht gebrochen. Wenn es bei einer Halbkreisscheibe zusätzlich durch die Mitte geht, wird es überhaupt nicht gebrochen. |
| H11 H14 | Das Licht, das durch die Mitte des Halbkreiskörpers geht, wird beim Austritt nicht gebrochen. Das Licht, das oberhalb oder unterhalb der Mitte durch den Halbkreiskörper geht, wird beim Austritt zur Mitte hin gebrochen, was das Phänomen einer Sammellinse beschreibt. |
| H15 | Beim Übergang von einem optisch dichteren in ein optisch dünneres Medium kann ab einem bestimmten Einfallswinkel kein Licht in das andere Medium gelangen. Es lässt sich kein gebrochener Lichtweg beobachten. |

⁴³ Die Voraussetzungen für statistische Methoden wie die Hauptkomponentenanalyse sind im Falle der Hypothesen nicht gegeben.

Motivationsaspekte

Die qualitative Inhaltsanalyse der Äußerungen bezüglich der Motivation bei der Arbeit mit dem Modell liefert sowohl positive als auch negative Motivationsaspekte. Es wurden insgesamt 145 Wortfolgen (Segmente) erfasst und kategorisiert, davon ist ein hoher Anteil positiv ($h = .77$), was sich mit den hohen Skalenskennwerten der KIM deckt. Neben der Unterteilung in positive und negative Aspekte wurde eine Verortung derselben Segmente in innerhalb oder außerhalb der Handlung vorgenommen (siehe Abschnitt „Motivationsaspekte“ in Kapitel 4.3.5). Der Anteil der Aspekte innerhalb der Handlung ist ebenfalls hoch ($h = .66$). Sie betreffen die Arbeit mit dem Modell an sich und keine äußeren Gegebenheiten, die mit der Lernumgebung und der Lernsituation rund um die Arbeit mit den Modellen oder den individuellen Lernvoraussetzungen zusammenhängen. Die Häufigkeiten der verschiedenen Kombinationen sind in einer Kreuztabelle dargestellt (siehe Tabelle 16). Auf den ersten Blick liegen die positiven Aspekte vor allem innerhalb der Handlung, während die negativen Aspekte eher außerhalb der Handlung liegen. Ein Chi-Quadrat-Test ergibt einen statistisch signifikanten Zusammenhang zwischen der Ausprägung des Faktors (positiv oder negativ) und seiner Verortung (innerhalb oder außerhalb), $\chi^2(1) = 28.18$, $p < .001$, $\phi = .44$, mittlerer Effekt nach Cohen (1988, S. 223ff).⁴⁴ Das deutet darauf hin, dass das dynamische Modell das Potenzial hat, vermehrt intrinsisch motivierte Handlungen anzuregen, während Aspekte, die die Motivation hemmen könnten, nicht so sehr mit der Arbeit mit dem Modell an sich, sondern mit äußeren Gegebenheiten zusammenhängen.

Tabelle 16: Absolute H und relative Häufigkeiten h der positiven und negativen Motivationsaspekte aufgeteilt nach innerhalb und außerhalb der Handlung

| | positive Aspekte | | negative Aspekte | | Gesamt | |
|------------------------|------------------|-----|------------------|-----|--------|------|
| | H | h | H | h | H | h |
| innerhalb der Handlung | 87 | .60 | 10 | .07 | 96 | .67 |
| außerhalb der Handlung | 24 | .17 | 24 | .17 | 49 | .33 |
| Gesamt | 111 | .77 | 34 | .23 | 145 | 1.00 |

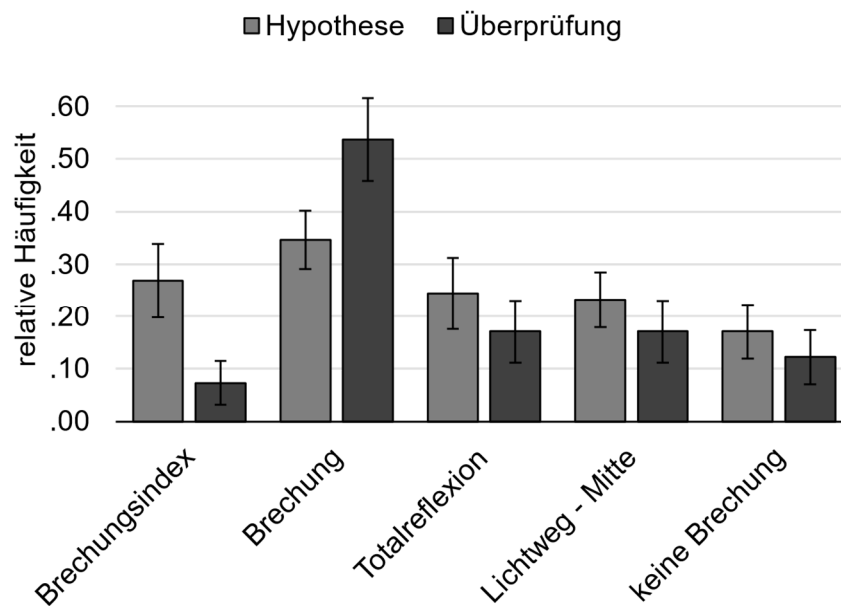
⁴⁴ Alle erwarteten Zellhäufigkeiten waren größer als 5.

4 Dynamische Modelle im Praktikum der Optik

Zu den zwei häufigsten positiven Aspekten innerhalb der Handlung zählen die Möglichkeit zur *selbstbestimmten Exploration* ($H = 44$) und die für ein Modell charakteristische *Elementarisierung und Visualisierung* ($H = 13$). Die breite Nennung der ersten Kategorie ist zum einen der Frage nach den Gründen für die wahrgenommene Wahlfreiheit geschuldet. Allerdings gehört rund die Hälfte der Äußerungen dieses Faktors zu der Frage, was an der Arbeit mit dem Modell interessant war. Weiterhin wird auch die Möglichkeit, *verschiedene Fälle zu modellieren*, positiv erwähnt ($H = 10$) genauso wie die *Überprüfung bestehender* ($H = 9$) bzw. der *Aufbau neuer Vorstellungen* ($H = 7$). Der am häufigsten genannte positive Faktor außerhalb der Handlung ist die wahrgenommene *Abwechslung* im Vergleich zu dem üblichen Ablauf des Praktikums ($H = 6$). An zweiter Stelle kommen mehrere Aspekte mit jeweils drei Nennungen wie (a) *vollständige Bearbeitung*, (b) *Erfahrung mit GeoGebra*, (c) *Vorkenntnisse in der Optik* und (d) *Lernen mit digitalen Medien*. Bei den insgesamt wenigen negativen Aspekten wird innerhalb der Handlung am häufigsten die von diesen Studierenden verspürte *Unbestimmtheit* aufgrund der offenen Arbeitsphase genannt ($H = 4$), gefolgt von einer *unübersichtlichen Gestaltung* des Modells an sich ($H = 2$). Außerhalb der Handlung bereitet einigen Studierenden ihre *fehlende Erfahrung mit GeoGebra* ($H = 5$) und die *unangenehme Beobachtung* im Rahmen der Studie bei der Arbeit mit dem Modell sorgen ($H = 4$).

Gemeinsamkeiten und Unterschiede

Die qualitative Inhaltsanalyse der vergleichenden Aussagen bezüglich des Modells und des Experiments liefert sowohl Gemeinsamkeiten als auch Unterschiede, die den Studierenden aufgefallen sind (siehe Tabelle 46 und Tabelle 47 im Anhang). Es wurden insgesamt 126 Wortfolgen (Segmente) in 13 Kategorien erfasst. Das heißt, es gibt im Durchschnitt fast 10 Aussagen pro Kategorie oder etwas mehr als drei Aussagen pro Person. Die Spannweite für diesen Wert beträgt fünf Aussagen mit eins als Minimum und sechs als Maximum. Dabei beschreiben 50 Aussagen die Gemeinsamkeiten in fünf verschiedenen Kategorien (Gem, $h_d = .24$) und 76 die Unterschiede (Unt, $h_d = .23$), die sich auf die Eigenschaften des Modells (mUnt, $h_d = .16$) und Eigenschaften des Experiments mit jeweils vier Kategorien aufteilen (eUnt, $h_d = .30$). Obwohl insgesamt mehr Unterschiede als Gemeinsamkeiten notiert werden, sind die Anteile eher ausgeglichen, wenn die Anzahl der möglichen Kategorien einbezogen wird (Vergleich der Häufigkeitsdichten, siehe Tabelle 53 im Anhang). Bei den Unterschieden werden jedoch rund doppelt so viele Eigenschaften des Experiments als Eigenschaften des



Anmerkung. Die Fehlerbalken entsprechen dem Standardfehler der relativen Häufigkeit.

Abbildung 35: Nach Differenzen absteigend sortiertes Säulendiagramm der relativen Häufigkeiten der Hypothesen und ihrer protokollierten Überprüfung

Modells angesprochen. Im Folgenden werden die einzelnen Gemeinsamkeiten und Unterschiede differenziert betrachtet.

Bei den Gemeinsamkeiten handelt es sich in erster Linie um die Eigenschaften des Systems, die zuvor im Modell beobachtet und als Kernhypothesen aufgeschrieben wurden, sodass direkte Vergleiche der relativen Häufigkeiten der verschiedenen Kategorien angestellt werden können (siehe Abbildung 35). Der Einfluss des Brechungsindex des Mediums auf die Brechung wird nach dem Experiment am seltensten erwähnt (GH2) und weist auch die größte Differenz zur entsprechenden Hypothese auf (KH2). Das ist insofern nicht verwunderlich, da es im Experiment keine Möglichkeit gab, diese Variable zu ändern und die entsprechende Beobachtung zu machen. Bei der allgemeinen Erwähnung der Brechung beim Ein- und Austritt aus der Halbkreisscheibe sieht es auf den ersten Blick umgekehrt aus: Rund die Hälfte schildert diese Beobachtung nach dem Experiment (GH1), während der Wert in derselben Kategorie nach dem Modell niedriger ausfällt (KH1). Das ist allerdings dem geschuldet, dass sich KH1 aus mehreren Teilhypothesen zusammensetzt, von denen ein Teil jedoch ähnliche Werte aufweist (H1 und H2), während bei der Kategorisierung der Gemeinsamkeiten keine entsprechende Differenzierung innerhalb einer einzelnen Kategorie stattfand. Bei

4 Dynamische Modelle im Praktikum der Optik

den anderen Kategorien liegen keine so großen Unterschiede in der Methodik vor. Als Ergebnis können ähnliche Werte für die Anteile der formulierten Hypothesen und ihrer Überprüfung durch das Experiment festgehalten werden.⁴⁵ Obwohl die Anteile in diesen Kategorien im Einzelnen niedrig sind, zeugt das davon, dass zumindest ein Teil der Studierenden in der Lage ist, entsprechende Hypothesen aus der Arbeit mit einem dynamischen Modell zu entnehmen und sie in einem Experiment zu überprüfen. Bei genauerer Betrachtung ergibt sich jedoch ein gemischtes Bild. In Tabelle 17 sind die Anteile der Studierenden aufgelistet, die zu den verschiedenen Kategorien entweder (a) keine, (b) nur nach dem Modell, (c) nur nach dem Experiment oder (d) nach beiden Phasen Angaben gemacht haben. Von den Studierenden, die allgemeine Angaben zur Brechung gemacht haben, haben 44 % dies sowohl nach der Arbeit mit dem Modell als auch nach der Durchführung des Experiments gemacht. Bei den restlichen Kategorien nimmt dieser Anteil weiter ab.

Bei der Betrachtung der Unterschiede wird deutlich, dass ungefähr die Hälfte der Teilnehmenden die Reflexion an der ersten Grenzfläche (Ref) und das gerätebedingte ungebrochene Licht im Experiment notiert (Ung, siehe Abbildung 36). Ungefähr ein Drittel beschreibt die generelle Genauigkeit des Modells im Vergleich zum Experiment (Gen) und die Ähnlichkeit der beiden Systeme (Sys).⁴⁶ Mit Anteilen von unter 20 % folgen die größere Anzahl der Variablen im Modell (Var) und die im Experiment sichtbare Totalreflexion (Tot). Die restlichen Unterschiede werden jeweils weniger als fünf Mal erwähnt. Vor allem auffällig ist, dass die im

Tabelle 17: Anteile der Studierenden mit und ohne Aussagen zu den Kernhypothesen nach dem Modell und ihrer Überprüfung im Experiment

| | Brechung | Brechungsindex | keine Brechung | Lichtweg – Mitte | Totalreflexion |
|-----------------------|-----------|----------------|----------------|------------------|----------------|
| keine Angabe | .22 | .68 | .63 | .56 | .68 |
| nur Modell | .24 (.31) | .24 (.77) | .24 (.67) | .27 (.61) | .15 (.46) |
| nur Experiment | .20 (.25) | .05 (.15) | .12 (.33) | .07 (.17) | .07 (.23) |
| Modell und Experiment | .34 (.44) | .02 (.08) | .00 (.00) | .10 (.22) | .10 (.31) |

Anmerkung. In Klammern sind die Anteile bezogen nur auf die Studierenden angegeben, die in dieser Kategorie Angaben gemacht haben.

⁴⁵ In der Kategorie *Totalreflexion* wird die Hypothese mit der Beschreibung der entsprechenden Beobachtung verglichen, die von den Studierenden als Unterschied formuliert wird, da im Modell der reflektierte Lichtweg im Inneren der Halbkreisscheibe nicht enthalten ist.

⁴⁶ Die Ähnlichkeit der Systeme ist eine allgemeine Gemeinsamkeit, die an dieser Stelle der Vollständigkeit halber in Relation zu den anderen Kategorien gesetzt wird.

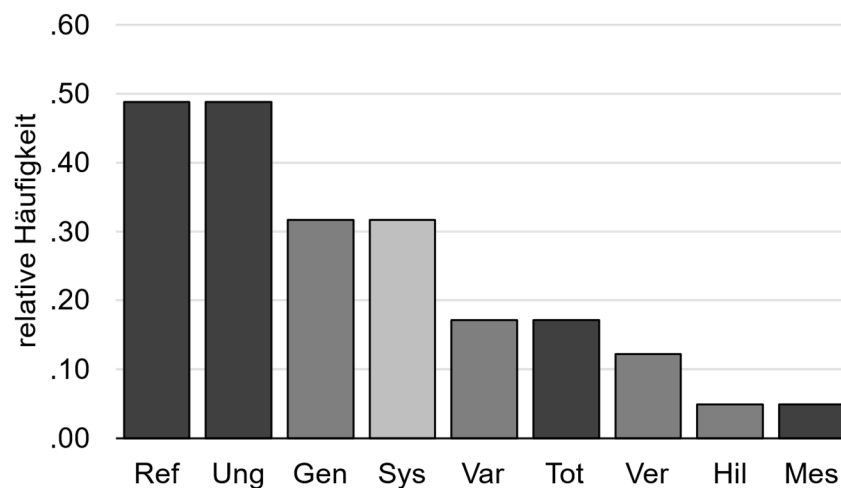


Abbildung 36: Absteigend sortiertes Säulendiagramm der relativen Häufigkeiten kodierter Gemeinsamkeiten (hellgrau), Unterschiede des Modells im Vergleich zum Experiment (grau) und umgekehrt (dunkelgrau).

Modell offensichtlich vorgenommenen Vereinfachungen (Ver) und die angebotenen Hilfestellungen (Hil) selten genannt werden. Stattdessen fällt die Genauigkeit der im Modell angegebenen Werte als Unterschied des Modells am häufigsten auf (Gen). Erkenntnistheoretisch sind die Aussagen in dieser Kategorie allerdings problematisch, da die vermeintliche Genauigkeit der Werte durch die willkürliche Anzahl der berechneten Nachkommastellen bei der Anwendung des Brechungsgesetzes bedingt ist. Das Maß für die Genauigkeit, mit der in den Naturwissenschaften Aussagen über die Natur gemacht werden können, ist das reale Experiment. In Lernsituationen geraten solche Tatsachen oft in den Hintergrund, was die Notwendigkeit von exemplarischen Erkenntnisprozessen im Unterricht unterstreicht.

Die Auswertung der Protokolle zum Vergleich des Modells und Experiments deutet insgesamt darauf hin, dass Hypothesen zwar bestätigt werden, aber die offensichtlichen Unterschiede, die vor allem im Experiment beobachtet werden können, einen Großteil der Aufmerksamkeit auf sich fokussieren. Das ist einerseits nicht verwunderlich, andererseits offenbart sich hiermit eine dem Experimentierprozess immanente Lernschwierigkeit: Nebeneffekte, die nicht im Fokus der gegenwärtigen Lerneinheit stehen, werden ausgiebig diskutiert und teilweise von den Lernenden als störend empfunden. Die im Modell vorliegenden Idealisierungen und Hilfestellungen werden zwar auch reflektiert, aber nicht in dem gewünschten Ausmaß.

4 Dynamische Modelle im Praktikum der Optik

Für die Unterschiede des Modells und Experiments wurde eine Hauptkomponentenanalyse mit Varimax-Rotation durchgeführt. Die Überprüfung des KMO-Kriteriums über alle Unterschiede hinweg liefert zwar ein akzeptables Ergebnis ($KMO = .58$), aber das Maß der Stichprobeneignung der Kategorie *Hilfestellungen* im Modell ist zu niedrig ($MSA = .40$). Aus den restlichen Unterschieden konnten zwei Faktoren extrahiert werden ($Chi\text{-}Quadrat(21) = 41.67$, $p < .01$, $KMO = .61$), die 50 % der Varianz erklären. Die rotierte Komponentenmatrix zeigt hohe Faktorladungen der sieben Unterschiede auf zwei Faktoren (siehe Tabelle 18, links). Der erste Faktor zeichnet sich dadurch aus, dass die zwei deutlichsten Unterschiede des Experiments genannt werden und die Ungenauigkeit der Messwerte im Vergleich zum Modell angemerkt wird. Außerdem werden die zusätzlichen Variablen des Modells nicht genannt. Der zweite Faktor umfasst die im Modell vorgenommene Fokussierung auf den gebrochenen Lichtweg, die sich auch dadurch kennzeichnet, dass die unter bestimmten Umständen im Experiment vorkommende Totalreflexion nicht vollständig dargestellt wurde. Außerdem wird die vermeintliche Genauigkeit der im Modell angegebenen Werte als Vorteil gesehen.

Die aus den notierten Unterschieden extrahierten Faktoren können charakterisiert werden als (a) *Reflexion des Experiments* (rde, Faktor 1), (b) *Reflexion des Modells* (rdm, Faktor 2). Die mithilfe der Koeffizienten in Tabelle 18 (rechts) berechneten individuellen Faktorwerte geben an, inwiefern Experiment und Modell reflektiert wurden.

Tabelle 18: Rotierte Komponentenmatrix (links) und Koeffizientenmatrix (rechts) der sieben Unterschiede zwischen Modell und Experiment

| Ziel | Komponente | | Komponente | |
|------|------------|-----|------------|------|
| | 1 | 2 | 1 | 2 |
| Var | -.74 | . | -.44 | -.06 |
| Ung | .64 | . | .35 | -.03 |
| Ref | .61 | . | .34 | -.01 |
| Mes | .58 | . | .39 | .19 |
| Ver | . | .76 | -.03 | .43 |
| Tot | . | .75 | .18 | .47 |
| Gen | . | .71 | .05 | .41 |

Anmerkung. Faktorladungen (links) mit einem Betrag von $< .30$ sind nicht enthalten.

4.4.3 Zusammenhänge

Zusammenhangsanalysen wie die Korrelation nach Pearson für lineare Beziehungen metrischer Variablen (Cleff, 2015b, S. 98) sowie die Rangkorrelation nach Spearman für monotone (nicht lineare) Beziehungen als nicht-parametrische Alternative (Cleff, 2015b, S. 102) liefern keine Hinweise über Kausalitäten. Es kann nur eine Aussage darüber getroffen werden, ob die erhobenen Merkmale innerhalb der betrachteten Stichprobe zusammen auftreten oder eher unabhängig voneinander vorkommen. Selbst wenn im Folgenden die Reihenfolge der Nennung zweier Merkmale eine vermeintliche Kausalität suggeriert, sind aufgrund der Datenlage der umgekehrte Fall oder eine Scheinkorrelation durch gemeinsame Ursachen denkbar (Cleff, 2015b, S. 125). Bei vorliegender Signifikanz kann davon ausgegangen werden, dass ein Zusammenhang der Daten vorliegt und das Ergebnis nicht zufällig aufgetreten ist. Darüber hinaus gibt der Korrelationskoeffizient an, wie stark der Zusammenhang ist.⁴⁷

Subskalen

Es können zunächst starke Zusammenhänge zwischen allen drei Subskalen der *mathematischen SWE* festgestellt werden (siehe Tabelle 19), sodass in die folgenden Analysen der Mittelwert aus allen drei Bereichen einbezogen wird. Die Subskala *Handwerk* korreliert mit den anderen Kompetenzen etwas stärker als *Visualisierung* und *Prozessfähigkeit* untereinander. Das könnte ein Hinweis darauf sein, dass die Beherrschung des mathematischen „Handwerkszeugs“ eine Grundvoraussetzung für die anderen, eher weiterführenden Fähigkeiten darstellt. Zusammenhänge zwischen den computerbezogenen Skalen werden aufgrund der nicht optimalen Voraussetzungen für eine parametrische Analyse mit der

Tabelle 19: Korrelationen der Subskalen der *mathematischen SWE*

| | Prozessfähigkeit | Handwerk |
|----------------|------------------|----------|
| Handwerk | .592** | |
| Visualisierung | .557** | .611** |

Anmerkung. ** $p < .01$

⁴⁷ Die verbale Einschätzung des Betrags eines Korrelationskoeffizienten basiert auf der Einteilung nach Cohen (1988) als Maß für die Effektstärke: ab .10 bis .29 kleiner Effekt/schwache Korrelation, ab .30 bis .49 mittlerer Effekt/moderate Korrelation und ab .50 großer Effekt/starke Korrelation (S. 79f).

4 Dynamische Modelle im Praktikum der Optik

Rangkorrelation nach Spearman gerechnet.⁴⁸ Die Ergebnisse in Tabelle 20 deuten darauf hin, dass je höher die *computerbezogene SWE* ist, desto niedriger ist die Computerangst generell und auch die Angst, den Computer zu beschädigen. Deshalb wird in die folgenden Analysen nur noch die *computerbezogene SWE* einbezogen. Die einzelnen Ängste treten in der vorliegenden Stichprobe allerdings eher unabhängig voneinander auf, was sich mit der schlechten Reliabilität einer Skala aus diesen zwei Items deckt. Die Skala *Computer beim Lernen* scheint ebenfalls unabhängig von der SWE oder den Ängsten zu sein, was so viel bedeutet, dass die insgesamt positive Einstellung gegenüber dem Lernen mit dem Computer nicht nur bei den Personen vorherrscht, die gut und gerne mit dem Computer arbeiten.

Lernbezogene Merkmale

Im Folgenden werden die Zusammenhänge zwischen den verschiedenen lernbezogenen Merkmalen betrachtet, die als individuelle Lernvoraussetzungen der Studierenden in Bezug auf die Arbeit mit dem Modell und das nachfolgende Experiment aufgefasst werden. Zunächst ist ein starker Zusammenhang zwischen der *mathematische SWE* und dem im Test gezeigten *Fachwissen zur Brechung* zu beobachten (siehe Tabelle 21). Hierbei handelt es sich mit großer Wahrscheinlichkeit um eine Scheinkorrelation. Der beobachtete Trend wird vermutlich durch einen gemeinsamen Grund ausgelöst. Infrage kommen allgemeine kognitive Fähigkeiten und Vorlieben, die sich auf den gesamten mathematisch-naturwissenschaftlichen Bereich auswirken. Die Vermutung lässt sich allerdings nicht bestätigen, da keine Daten diesbezüglich erhoben wurden. Des Weiteren hängt

Tabelle 20: Rangkorrelationen nach Spearman der computerbezogenen Skalen

| | comp. SWE | Computer machen mit Angst. | Computer [...] beschädigen könnte. |
|------------------------------------|-----------|----------------------------|------------------------------------|
| Computer machen mit Angst. | -.597** | | |
| Computer [...] beschädigen könnte. | -.406** | .238 | |
| Computer beim Lernen | .292 | -.189 | -.279 |

Anmerkung. ** $p < .01$

⁴⁸ Die beiden Items zur Computerangst haben eine schiefe Verteilung und die Skala *Computer beim Lernen* eine besonders schmale mit einer Reihe von Ausreißern nach oben und unten. Sofern nichts anderes angegeben ist, werden im Folgenden Korrelationen nach Pearson berichtet.

4 Dynamische Modelle im Praktikum der Optik

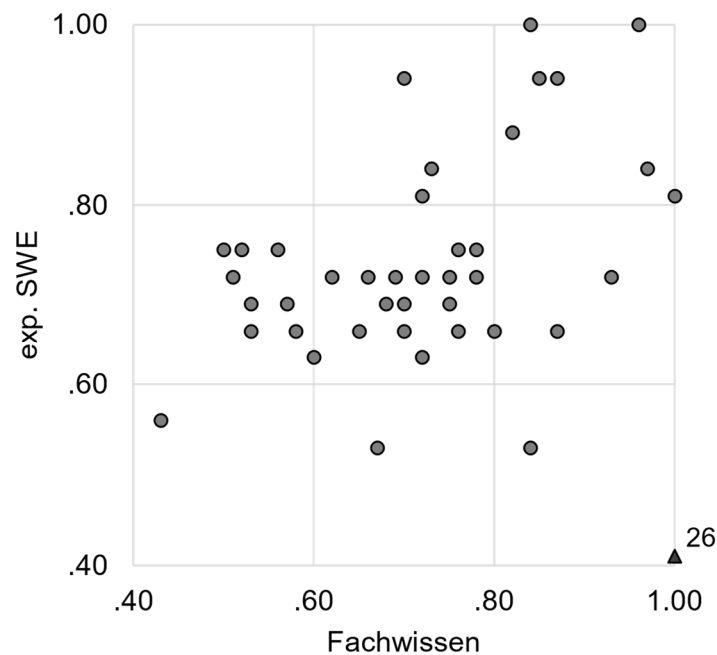


Abbildung 37: Streudiagramm des Fachwissens und der experimentierbezogenen SWE

die *experimentierbezogene SWE* ebenfalls mit dem Fachwissen zusammen. Allerdings ist der Zusammenhang weniger stark und wird nur signifikant, wenn der im Streudiagramm in Abbildung 37 ersichtliche Ausreißer mit der ID 26 von der Berechnung ausgeschlossen wird. Es handelt sich dabei um den im Vergleich zum Rest der Stichprobe atypischen Fall eines besonders hohen Ergebnisses im Fachwissenstest bei gleichzeitig mit Abstand niedrigster SWE bezüglich des Experimentierens. Dasselbe gilt in ähnlicher Form auch für die anderen Merkmale, sodass nach Ausschluss insgesamt ein starker Zusammenhang zur *mathemati-*

Tabelle 21: Korrelationen der lernbezogenen Merkmale

| | Fachwissen | math. SWE | exp. SWE ^a | exp. SWE |
|-----------------------------------|------------|-----------|-----------------------|----------|
| math. SWE | .558** | | | |
| exp. SWE ^a | .456** | .509** | | |
| exp. SWE | .269 | .340* | 1.00** | |
| comp. SWE | .344* | .405** | .406** | .446** |
| Computer beim Lernen ^b | .284 | .469** | .259 | .275 |

Anmerkung. ** $p < .01$, * $p < .05$

a. ohne Ausreißer 26, $n = 40$

b. Rangkorrelation nach Spearman

4 Dynamische Modelle im Praktikum der Optik

schen und ein moderater zur *computerbezogenen SWE* vorliegt. Bei dem letzten Merkmal liegen auch moderate Zusammenhänge mit dem Fachwissen und der *mathematischen SWE* vor, allerdings schwächer ausgeprägt. Bei dem gemeinsamen Merkmal, das sich unterschiedlich stark auf diverse SWE auswirkt, könnte es sich um das allgemeine Selbstkonzept der Studierenden bezüglich ihrer Fähigkeiten im Praktikum handeln. Anders sieht es hingegen bei der positiven Einstellung zum Lernen mit dem Computer aus. Die wiederum mithilfe der Rangkorrelation nach Spearman berechneten Werte deuten nur auf einen Zusammenhang mit der *mathematischen SWE* hin. Die gemeinsame Ursache dafür könnte die Präsenz des Themas im Kontext des Lehrens und Lernens der Mathematik sein.

Arbeit mit dem Modell

Als Merkmale der Arbeit mit dem Modell wurden die Zeit der Interaktion sowie Art und Anzahl der im Modell erreichten Ziele erfasst. Aus den Zielen konnten im vorherigen Kapitel als Ergebnis einer explorativen Faktorenanalyse drei voneinander unabhängige Gruppen von Zielen identifiziert werden. In Tabelle 22 sind die Korrelationen der drei individuellen Faktorwerte mit den primären Merkmalen dargestellt. Aufgrund der begrenzten Anzahl der Ziele ist theoretisch kein linearer, sondern höchstens monotoner Zusammenhang der Zeit mit den restlichen Merkmalen zu erwarten, sodass diese Kombinationen mit der Rangkorrelation nach Spearman berechnet wurden. Diese Analyseverfahren erlaubt es auch, die drei Ausreißer mit ungewöhnlich großen Zeiten der Interaktion in der Stichprobe zu belassen.⁴⁹ Zunächst kann der starke Zusammenhang der Zeit der Interaktion mit der Anzahl der im Modell erreichten Ziele beobachtet werden. Das Ergebnis

Tabelle 22: Korrelationen der Merkmale der Arbeit mit dem Modell

| | Zeit mit dem Modell ^a | Ziele des Modells |
|--|----------------------------------|-------------------|
| Ziele des Modells | .592** | |
| Anpassung der Oberfläche (Modell) | .476** | .647** |
| Veränderung der Eigenschaften (Modell) | . | . |
| Untersuchung des Systems (Modell) | .341* | .694** |

Anmerkung. ** $p < .01$, * $p < .05$, Korrelationskoeffizienten unter .20 werden nicht angegeben.

a. Rangkorrelation nach Spearman

⁴⁹ Das alternative Vorgehen, bei dem die Ausreißer ausgeschlossen und Korrelationen nach Pearson berechnet werden, wurde geprüft und liefert dieselben Zusammenhänge mit einer ähnlichen Stärke. Die Ergebnisse werden der Übersichtlichkeit halber nicht zusätzlich aufgeführt.

entspricht einerseits der Erwartung, dass eine längere Lernzeit eine höhere Leistung nach sich zieht. Auf der anderen Seite bestätigt der Zusammenhang, dass die angewandte Methodik dafür geeignet ist, relevante Zeiten und Ziele zu erfassen. Des Weiteren lassen sich moderate Zusammenhänge der mit dem Modell verbrachten Zeit mit zwei Faktoren beobachten. Es scheint, dass die Personen, die sich länger mit dem Modell beschäftigen, in vielen Fällen der Anpassung der Modelloberfläche nachgehen, aber auch das System an sich untersuchen. Die Veränderung der Eigenschaften des Modells (hier des Brechungsindex) geschieht allerdings unabhängig von der Zeit mit dem Modell und der Anzahl erreichter Ziele insgesamt. Die starken Zusammenhänge der anderen Faktoren mit der Anzahl der Ziele lassen sich vor allem mit der größeren Zahl der Ziele innerhalb der Faktoren erklären.

Nachdem die Zusammenhänge zwischen den verschiedenen lernbezogenen Merkmalen und den Merkmalen der Arbeit mit dem Modell getrennt untersucht wurden, stellt sich die Frage, ob bestimmte individuelle Lernvoraussetzungen mit den erfassten Verhaltensweisen einhergehen. Bei den Werten in Tabelle 23 fällt zunächst auf, dass die beobachteten Zusammenhänge keine hohen Koeffizienten und teilweise keine Signifikanz aufweisen. Vor allem ist keiner der erfassten Merkmale in der Lage, auch nur annähernd als möglicher Prädiktor dafür zu gelten, ob eine Person sich auf eigenen Wunsch länger oder kürzer mit dem Modell beschäftigt. Es gibt allerdings schwache Hinweise darauf, wann eine größere Zahl der möglichen Ziele des Modells erreicht werden. Es handelt sich zumindest in dieser Stichprobe um Personen, die eine eher höhere *mathematische* und *experimentierbezogene SWE* aufweisen. Die positive Einstellung zum Lernen mit

Tabelle 23: Korrelationen der lernbezogenen Merkmale mit den Merkmalen der Arbeit mit dem Modell

| | Zeit mit dem Modell ^a | Ziele des Modells | Anpassung der Oberfl. | Veränderung der Eigensch. | Untersuchung des Systems |
|-----------------------------------|----------------------------------|-------------------|-----------------------|---------------------------|--------------------------|
| Fachwissen | . | .228 | .313* | . | . |
| math. SWE | . | .337* | .386* | . | . |
| exp. SWE | . | .316* | . | -.235 | .260 |
| comp. SWE | . | . | .220 | . | . |
| Computer beim Lernen ^a | . | .272 | .313* | . | . |

Anmerkung. * $p < .05$, Korrelationskoeffizienten unter .20 werden nicht angegeben.

a. Rangkorrelation nach Spearman

4 Dynamische Modelle im Praktikum der Optik

dem Computer, ein höheres Fachwissen zum Inhalt des Modells und vor allem die *computerbezogene SWE* scheinen eine kleinere bis gar keine Rolle zu spielen. Was die einzelnen Faktoren der Arbeit mit dem Modell angeht, ist bemerkenswert, dass bis auf die *experimentierbezogene SWE* alle lernbezogenen Merkmale Zusammenhänge allenfalls zur Anpassung der Oberfläche des dynamischen Modells aufweisen. Dieser Faktor ist allerdings derjenige, der den Inhalt des physikalischen Modells am wenigsten betrifft. Umgekehrt weist die *experimentierbezogene SWE* als einziges Merkmal (nicht signifikante) Zusammenhänge zu den anderen beiden Faktoren auf. Der Faktor, der die Veränderung des Brechungsindex beschreibt, weist eine negative Korrelation auf, während die Untersuchung des Systems mit der experimentierbezogenen SWE positiv korreliert. Die berechneten Zusammenhänge deuten darauf hin, dass die Arbeit mit einem dynamischen Modell Ähnlichkeiten zum Experimentieren aufweist. Es lässt sich die Vermutung aufstellen, dass je mehr Freude am Experimentieren vorliegt und Zeit zum Explorieren investiert wird, desto gründlicher das dynamische Modell untersucht wird. Weitere Vorerfahrungen oder Kenntnisse erleichtern laut den vorliegenden Daten höchstens den Umgang mit den Bedienelementen, führen aber nicht zwangsweise zu einer zielgerichteten Arbeit mit dem Modell. Im Folgenden wird deshalb untersucht, welche Rolle die intrinsische Motivation im Lernprozess mit dynamischen Modellen spielt.

Intrinsische Motivation

Die Kurzskala intrinsischer Motivation besteht aus mehreren Skalen, die unterschiedliche Aspekte messen, die sich positiv (*Interesse/Vergnügen, wahrgenommene Kompetenz* und *Wahlfreiheit*) oder negativ auf die Motivation beim Lernen auswirken (*Druck/Anspannung*). Die berechneten Werte in Tabelle 24 deuten darauf hin, dass die vier Skalen, zumindest was die Arbeit mit dem dynamischen Modell angeht, größtenteils unabhängig voneinander sind. Nur die Skalen *Druck/Anspannung* und *wahrgenommene Kompetenz* weisen eine starke negative Korrelation auf. Demnach fühlten sich Personen, die z. B. durch die Beobachtung während der Studie Druck und Anspannung verspürt haben, weniger kompetent während der Arbeit mit dem Modell. Das lag nach eigenen Angaben u. a. auch an den fehlenden Vorerfahrungen im Umgang mit solchen Modellen.⁵⁰ Es ist zudem bemerkenswert, dass beide Aspekte scheinbar keinen Einfluss auf das

⁵⁰ Das geht aus der zuvor beschriebenen qualitativen Auswertung der Erläuterungen der Studierenden zu ihren Antworten hervor (siehe Abschnitt „Motivationsaspekte“ in Kapitel 4.4.2).

grundsätzliche Interesse oder das Vergnügen während der Arbeit mit dem dynamischen Modell haben. Dieses Ergebnis kommt allerdings erst zustande, wenn der bereits anhand des Boxplots in Abbildung 28 erkennbare Ausreißer 6 mit besonders wenig Interesse ausgeschlossen wird (siehe Abschnitt „Verteilungen“ in Kapitel 4.4.1). Es verbleiben danach schwache Hinweise, dass *Interesse/Vergnügen* mit *wahrgenommener Wahlfreiheit* zusammenhängt. Das deckt sich auch mit den Aussagen der Studierenden, die unter die Kategorie *Selbstbestimmung* fallen. Sie liegen nicht nur als Grund für die Wahrnehmung der Wahlfreiheit, sondern auch in vielen Fällen für den Spaß während der Arbeit mit dem Modell vor.

Was die Zusammenhänge der Skalen intrinsischer Motivation mit den Merkmalen des Modells in Tabelle 25 angeht, fällt zunächst auf, dass die Berechnungen keine signifikanten Korrelationen liefern. Die folgenden Ausführungen sollten deshalb nur als vorsichtige Deutungen der insgesamt schwachen Hinweise verstanden werden. Fest steht allerdings, dass das von den Studierenden bekundete Interesse bzw. der Spaß an der Arbeit mit dem Modell keinen erkennbaren Zusammenhang damit hat, wie und wie lange mit dem Modell gearbeitet wurde. Es gibt damit Personen, die sich ausführlich mit dem Modell beschäftigt haben, obwohl es ihnen weniger Spaß gemacht hat. Das könnte für diejenigen gelten, die das Praktikum als Notwendigkeit im Rahmen ihres Studiums erachten. Auf der anderen Seite gibt es auch Personen, die sich aus anderen Gründen oberflächlich mit dem Modell beschäftigt haben, obwohl sie es als interessant erachten. Bei den zwei zusammenhängenden Skalen zur wahrgenommenen Kompetenz und zum Druck können jedoch Zusammenhänge mit der Arbeit mit dem Modell vermutet werden. Diejenigen, die sich ausgiebig mit dem Modell auseinandergesetzt haben, schreiben sich zumindest in einigen Fällen diesbezüglich auch eine höhere Kompetenz zu und verspüren währenddessen weniger Druck. Be-

Tabelle 24: Korrelationen der Skalen intrinsischer Motivation

| | Interesse/ Vergnügen | Interesse/ Vergnügen ^a | wahrg. Kompetenz | wahrg. Wahlfreiheit |
|---------------------|-------------------------|--------------------------------------|---------------------|------------------------|
| wahrg. Kompetenz | .340* | . | . | . |
| wahrg. Wahlfreiheit | .375* | .267 | . | . |
| Druck/Anspannung | -.216 | . | -.661** | . |

Anmerkung. ** $p < .01$, * $p < .05$, Korrelationskoeffizienten unter .20 werden nicht angegeben.

a. ohne Ausreißer 6, $n = 40$

4 Dynamische Modelle im Praktikum der Optik

merkwürdigerweise gilt das nur für die Zahl der im Modell vollzogenen Handlungen (erreichter *Ziele des Modells*) und nicht für den vermutlich lernrelevantesten Teil *Untersuchung des Systems*. Schließlich könnte ein schwacher, negativer Zusammenhang zwischen der wahrgenommenen Wahlfreiheit und der Veränderung des Brechungsindex im Modell in Frage kommen, was zunächst nach einem Widerspruch klingt. Allerdings ist dieser Faktor bei den Personen ausgeprägt, die sich vorwiegend auf den zugehörigen Schieberegler konzentriert und nicht den Lichtweg an sich durch die Verschiebung der Punkte variiert haben. Es kann somit sein, dass gerade sie die im Grunde vorhandene Wahlfreiheit nicht so stark wahrgenommen haben. Insgesamt sind die Skalen intrinsischer Motivation jedoch wenig aufschlussreich, vor allem was das zielgerichtete Arbeiten mit dem Modell angeht (*Untersuchung des Systems*).

Kernhypothesen

Ein elementarer Bestandteil des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten didaktischen Konzepts ist der Lernschritt *Konkretisieren* (siehe Kapitel 3.1.2). Demnach erfolgt die Formulierung einer begründeten Hypothese erst nach der Auseinandersetzung mit einem auf naturwissenschaftlichen Prinzipien basierten Modells. Dynamische Modelle treten in diesem Zusammenhang als Simulationen auf, die ein virtuelles Experimentieren ermöglichen. Die während der Arbeit mit dem Modell auftretenden Beobachtungen und gesammelten Erfahrungen sollen als

Tabelle 25: Korrelationen der Skalen intrinsischer Motivation mit den Merkmalen der Arbeit mit dem Modell

| | Zeit mit dem Modell ^a | Ziele des Modells | Anpassung der Oberfl. | Veränderung der Eigensch. des Systems | Untersuchung des Systems |
|--------------------------------------|----------------------------------|-------------------|-----------------------|---------------------------------------|--------------------------|
| Interesse/ Vergnügen | . | . | . | . | . |
| Interesse/ Vergnügen ^b | . | . | . | . | . |
| wahrg. Kompetenz | .235 | .216 | .224 | .237 | . |
| wahrg. Wahlfreiheit | . | . | . | -.219 | . |
| Druck/ Anspannung | -.237 | -.265 | -.289 | . | . |

Anmerkung. Korrelationskoeffizienten unter .20 werden nicht angegeben.

a. Rangkorrelation nach Spearman

b. ohne Ausreißer 6, $n = 40$

Grundlage für die Formulierung von Hypothesen dienen (siehe These 6 in Kapitel 3.1.4). Deshalb sind besonders die Zusammenhänge zwischen den erfassten Merkmalen der Arbeit mit dem Modell und den formulierten Hypothesen von Interesse.

Zunächst können keine nennenswerten Zusammenhänge zwischen der Anzahl der Hypothesen und der mit dem Modell verbrachten Zeit oder der Anzahl der im Modell erreichten Ziele beobachtet werden. Dasselbe gilt auch für die drei Faktoren der Arbeit mit dem Modell (alle Koeffizienten nach Pearson und Spearman jeweils kleiner als .20). Allerdings sind diese Ergebnisse insofern nicht überraschend, da es große inhaltliche Unterschiede sowohl bei der Arbeit mit dem Modell als auch innerhalb der Hypothesen gibt, die sich nicht in der Gesamtanzahl widerspiegeln. Deshalb werden im Folgenden Vergleiche zwischen Personengruppen angestellt, die eine bestimmte Kernhypothese aus Tabelle 15 in Abschnitt „Hypothesen und Kernhypothesen“ in Kapitel 4.4.2 zumindest teilweise ($KH_i > 0$ mit i von 1 bis 5) oder gar nicht formuliert haben ($KH_i = 0$). Die Stichprobe teilt sich in Abhängigkeit der formulierten Kernhypothesen ungleichmäßig auf. Während die Feststellung, dass das Licht beim Übergang auf die eine oder andere Weise gebrochen wird (KH1, Brechung), von 24 Studierenden formuliert wird, werden die restlichen Kernhypothesen zumindest teilweise von 15 (KH4, Lichtweg durch die Mitte), elf (KH2, Brechungsindex) und zehn Personen angesprochen (KH3, keine Brechung und KH5, Totalreflexion). Bei der Analyse der Zusammenhänge zwischen den Hypothesen in Tabelle 26 fällt auf, dass die meisten Aussagen unabhängig voneinander getätigt werden. Lediglich die Beschreibung der Situation, in der keine Brechung stattfindet, ist ein Zeichen dafür, dass scheinbar seltener auf die Rolle des Brechungsindex bei der Brechung und auf den Lichtweg durch die Mitte der Halbkreisscheibe eingegangen wird.

Tabelle 26: Korrelationen der Kernhypothesen

| | Brechung | Brechungsindex | keine Brechung | Lichtweg durch die Mitte |
|--------------------------|----------|----------------|----------------|--------------------------|
| Brechungsindex | . | | | |
| keine Brechung | . | -.216 | | |
| Lichtweg durch die Mitte | . | . | -.313* | |
| Totalreflexion | . | . | . | . |

Anmerkung. * $p < .05$, Korrelationskoeffizienten unter .20 werden nicht angegeben.

4 Dynamische Modelle im Praktikum der Optik

Die nachfolgenden Analysen sollen aufzeigen, ob es Unterschiede in den drei Faktorwerten der Personen gibt, die nach der Arbeit mit dem Modell bestimmte Kernhypothesen formuliert haben oder nicht. Genauso wie bei den Zusammenhangsanalysen kann hier nicht von einer Kausalität ausgegangen werden. Die vollständigen Ergebnisse der Mittelwertvergleiche können Tabelle 54 bis Tabelle 56 im Anhang entnommen werden (Varianzgleichheit angenommen).⁵¹ Was den Faktor *Anpassung der Oberfläche des Modells* angeht, lassen sich bei allen fünf Kernhypothesen keine auch nur annähernd signifikanten Unterschiede beobachten. Das spricht für die bisherige Einschätzung, dass die damit verbundenen Ziele des Modells keinen großen Einfluss auf die Erkenntnisse der Studierenden haben. Für den Faktor *Veränderung der Eigenschaften des Modells* (Brechungsindex der Halbkreisscheibe) liegen jedoch andere Ergebnisse vor. Die Personen, die den Einfluss des Brechungsindex auf die Brechung in ihren Hypothesen beschreiben (KH2), sind mehrheitlich auch diejenigen, die sich zuvor mit dem entsprechenden Schieberegler beschäftigt haben ($p = .037$, $d = .76$). Die Gruppe, die sich zur Brechung nur allgemein geäußert hat (KH1), erreicht in diesem Faktor ebenfalls einen höheren Wert, der Unterschied ist allerdings nur annähernd signifikant ($p = .059$, $d = .62$). Der dritte Faktor, der die Arbeit mit dem dynamischen Modell im engeren Sinne ausmacht (*Untersuchung des Systems im Modell*), scheint ebenfalls einen Einfluss auf einen Teil der formulierten Hypothesen gehabt zu haben. Die Gruppe, die sich zum Phänomen der Totalreflexion geäußert hat (KH5), erreicht in diesem Faktor signifikant höhere Werte ($p = .042$, $d = .76$). Auch die Schilderungen bezüglich des Lichtweges durch die Halbkreisscheibe und der Notwendigkeit, die Mitte anzuvisieren (KH4), können vermutlich auf diesen Faktor zurückgeführt werden. Allerdings ist die Differenz der Mittelwerte hier wiederum nur annähernd signifikant ($p = .082$, $d = .58$). Beide Hypothesen erfordern jedoch eine vielseitige Variation der Parameter, um die entsprechende Beobachtung zu machen. Die Ergebnisse stützen somit die Vermutung, dass die Arbeit mit dem Modell die Studierenden diesbezüglich unterstützt hat. In diesem Zusammenhang gilt es jedoch auch den möglichen Einfluss des Fachwissens zur Brechung auf die Formulierung der Hypothesen zu prüfen.⁵²

⁵¹ Zur Absicherung der Ergebnisse wurden aufgrund der geringen und unterschiedlich großen Gruppengrößen neben t-Tests auch nicht-parametrische Mann-Whitney-U-Tests gerechnet. Es liegen ungefähr die gleichen Signifikanzwerte bei denselben Gruppenvergleichen vor.

⁵² Die restlichen Merkmale (SWE, Computerangst und Einstellung zum Lernen mit dem Computer) weisen keinen direkten Bezug zur Formulierung von Hypothesen zur Brechung auf, so dass etwaige Zusammenhänge nicht untersucht werden.

Folgende Unterschiede liegen im Fachwissen der Gruppen in Bezug auf die fünf Kernhypothesen vor (siehe Tabelle 57 im Anhang). Die zehn Personen, die etwas zur Totalreflexion geschrieben haben, schneiden deutlich besser im Fachwissenstest ab ($p = .018$, $d = .90$). Wohingegen die allgemeinen Aussagen zur Brechung und vor allem zum Brechungsindex von Personen geschrieben wurden, die im Durchschnitt ein schlechteres Testergebnis aufweisen ($p = .080$, $d = -.57$ und $p = .031$, $d = -.79$). Was auf den ersten Blick widersprüchlich erscheint, lässt sich so interpretieren, dass Personen mit einem höheren Fachwissen zur Brechung es nicht für nötig erachten, einfache und vermeintlich offensichtliche Aussagen zur Brechung zu formulieren, sondern sich eher auf komplexere Zusammenhänge konzentrieren. Darüber hinaus finden sich jedoch keine signifikanten Unterschiede im Fachwissen der Gruppen bezüglich der Kernhypothesen, vor allem auch nicht in Bezug auf den Lichtweg durch die Halbkreisscheibe. Des Weiteren werden die Aussagen zu den Situationen, in denen keine Brechung stattfindet, von Personen geschrieben, die sich weder im Umgang mit dem Modell noch im Fachwissen von dem Rest der Stichprobe unterscheiden. Es zeichnet sich ein Bild ab, bei dem die intendierte Auseinandersetzung mit dem Modell (*Untersuchung des Systems*) dazu geführt hat, dass entsprechende Hypothesen häufiger formuliert werden (*Lichtweg durch die Halbkreisscheibe*, KH4), und zwar unabhängig vom unmittelbaren Vorwissen der Studierenden (*Fachwissen zur Brechung*). Die Anteile einiger weniger relevanten Hypothesen lassen sich stattdessen mit der oberflächlichen Auseinandersetzung mit dem Modell in Verbindung bringen oder auf vorhandenes Fachwissen zurückführen.

Schließlich wurden auch mögliche Zusammenhänge zwischen den Skalen intrinsischer Motivation und der Formulierung bestimmter Hypothesen geprüft. Bis auf eine Ausnahme weisen die Gruppen bezüglich aller fünf Kernhypothesen keinerlei Unterschiede in den Skalen auf, sodass auf eine vollständige Darstellung der Mittelwertvergleiche an dieser Stelle verzichtet wird. Lediglich die Gruppe, die eine Hypothese zum Lichtweg durch die Mitte formuliert hat, gibt eine im Durchschnitt etwas höhere wahrgenommene Kompetenz an ($M = .59$, $SD = .17$, $n = 15$) als die Gruppe, die diese Hypothese nicht formuliert hat ($M = .48$, $SD = .19$, $n = 26$). Dieser Unterschied ist annähernd signifikant mit einem mittleren Effekt ($t(39) = 1.939$, $p = .060$, $d = .63$, Varianzgleichheit angenommen). Dieses Ergebnis ist dennoch bemerkenswert, da diese Hypothese die wesentliche Erkenntnis des Modells darstellt. Die Personen, die zu ihr gelangt sind, scheinen das in vielen Fällen realisiert zu haben, sodass sie sich eine höhere Kompetenz zugeschrieben haben. Im Folgenden wird untersucht, inwiefern die Handlungen

4 Dynamische Modelle im Praktikum der Optik

im Experiment mit der Arbeit mit dem Modell und der Formulierung der Hypothesen zusammenhängen.

Experimentieren

Zunächst werden die Zusammenhänge der erfassten Merkmale des Experiments untereinander betrachtet (siehe Tabelle 27). Obwohl die Zeit zur Verschriftlichung der Beobachtungen nicht von der Interaktion mit den Materialien getrennt werden konnte, wird auch hier der (monotone) Zusammenhang der mit dem Experiment verbrachten Zeit mit den im Experiment erreichten Zielen deutlich. Des Weiteren lässt sich den Werten entnehmen, dass die Gruppen, die sich ausgiebig mit der Untersuchung des Systems im Experiment beschäftigt haben, sich mehr Zeit für die Durchführung des Experiments genommen haben. Die meisten im Experiment zu erreichenden Ziele hängen jedoch stark mit der Vorbereitung und nur moderat mit der Durchführung der Messung oder der Untersuchung des Systems zusammen.

Um Zusammenhänge zwischen den Handlungen der Gruppen im Experiment und den individuellen Lernvoraussetzungen sowie der Arbeit mit dem Modell zu untersuchen, werden wiederum Gruppenmittelwerte dieser Merkmale betrachtet.⁵³ Wie der Tabelle 28 zu entnehmen ist, gibt es nur einen signifikanten Zusammenhang zwischen der Zeit mit dem Experiment und dem Faktor, der für Veränderungen der Eigenschaften des Modells steht: Die Personen, die sich im Modell stark auf den einen Schieberegler für den Brechungsindex fokussiert haben, verbrachten in der Gruppe nicht viel Zeit mit dem Experimentieren. Das könnte u. a. daran liegen, dass diese Veränderung im Experiment nicht möglich war. Stattdessen lag der Schwerpunkt auf dem Verlauf des Lichts durch die Halbkreis-

Tabelle 27: Korrelationen der Merkmale des Experiments ($N = 20$)

| | Zeit mit dem Experiment ^a | Ziele des Experiments |
|---------------------------------|--------------------------------------|-----------------------|
| Ziele des Experiments | .607** | |
| Vorbereitung der Messung (Exp.) | .309 | .726** |
| Durchführung der Messung (Exp.) | . | .470* |
| Untersuchung des Systems (Exp.) | .485* | .458* |

Anmerkung. ** $p < .01$, * $p < .05$, Korrelationskoeffizienten unter .20 werden nicht angegeben.

a. Rangkorrelation nach Spearman

⁵³ Als lernbezogene Merkmale für diese Phase des Praktikums werden das Fachwissen und die experimentierbezogene SWE in die Berechnungen einbezogen.

scheibe, den diese Gruppen scheinbar auch seltener untersuchten. Dieses Ergebnis spricht dafür, dass sich manche Lernenden eigene Schwerpunkte setzen, wenn Modelle und Experimente viele Variablen enthalten, sodass sie nicht alle bzw. nicht die von den Lehrenden präferierten Ziele erreichen. Weiterhin gibt es einen annähernd signifikanten moderaten Zusammenhang zwischen der experimentierbezogenen SWE und der Durchführung der Messung ($p = .065$). Da die Korrelation jedoch negativ ist, ergibt sich daraus die kontraintuitive Vermutung, dass je selbstsicherer die experimentierenden Studierenden sind, desto weniger experimentelle Handlungen sie für notwendig erachten. Sie wird dadurch gestützt, dass auch weitere Merkmale des Experiments mit einem negativen Vorzeichen versehen sind. Aufgrund der Schwäche der Zusammenhänge und fehlender Signifikanz wird auf weitere Interpretationen verzichtet. Es ist bemerkenswert, dass die Faktoren, die für die Untersuchung des Systems im Modell und im Experiment stehen, keinen Zusammenhang aufweisen. Im Folgenden wird deshalb auch geprüft, inwiefern die nach der Arbeit mit dem Modell formulierten Hypothesen den Experimentierprozess beeinflussen.

Tabelle 28: Korrelationen der Merkmale des Experiments mit den lernbezogenen Merkmalen sowie der Arbeit mit dem Modell

| | Zeit mit dem Exp. ^a | Ziele des Exp. | Vorb. der Messung (Exp.) | Durchf. der Messung (Exp.) | Unters. des Systems (Exp.) |
|--------------------------------------|--------------------------------|----------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Fachwissen | . | . | .285 | . | . |
| exp. SWE | . | -.342 | -.227 | -.421 | . |
| Zeit mit dem Modell ^a | . | . | . | .244 | . |
| Ziele des Modells | . | . | .236 | -.249 | . |
| Anpassung der Oberfl. (Modell) | . | . | . | -.322 | . |
| Veränderungen der Eigensch. (Modell) | -.517* | . | . | . | -.261 |
| Untersuchung des Systems (Modell) | . | .267 | .313 | . | . |

Anmerkung. * $p < .05$, Korrelationskoeffizienten unter .20 werden nicht angegeben.

a. Rangkorrelation nach Spearman

4 Dynamische Modelle im Praktikum der Optik

Die Stichprobe bestehend aus 20 Gruppen wurde so aufgeteilt, dass mindestens eine Person in der Gruppe eine bestimmte Kernhypothese formuliert hat (KH1 bis KH5). Der Vergleich der Mittelwerte dieser Gruppen bezüglich der verschiedenen Merkmale des Experiments hat jedoch keine signifikanten Unterschiede geliefert. Ein ähnliches Vorgehen bezüglich der nach dem Experiment formulierten Gemeinsamkeiten zwischen Modell und Experiment, die als Überprüfung dieser Hypothesen aufgefasst werden können, hat ebenfalls zu keinen nennenswerten Ergebnissen geführt. Das liegt teilweise auch daran, dass die Gruppengrößen zu unterschiedlich sind (zwischen 2 zu 18 und 6 zu 14). Das deutet insgesamt darauf hin, dass eine eigenständige Überprüfung der nach der Arbeit mit dem Modell formulierten Hypothesen und eine entsprechende Protokollierung für viele Studierende nicht selbstverständlich erschienen ist. Die Anweisung, „alle Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen dem Modell [...] und dem Experiment“ zu notieren (Teichrew, 2022, Experiment zum Brechungsgesetz, Durchführung), war zu diesem Zweck nicht aussagekräftig genug, sodass nur vereinzelte Gruppen auf einzelne Aspekte eingegangen sind. Die ausformulierten Gemeinsamkeiten weisen untereinander auch keine nennenswerten Zusammenhänge auf, sodass auf eine tabellarische Darstellung verzichtet wird.

Es gibt allerdings einige Zusammenhänge zwischen den fünf Kernhypothesen und dem, was letztendlich als ihre Überprüfung bzw. Gemeinsamkeit im Rahmen des Vergleiches zwischen Modell und Experiment formuliert worden war (siehe Tabelle 29). Zumindest für das im Modell angedeutete und im Experiment beobachtete Phänomen der Totalreflexion gibt es einen nicht besonders starken, aber signifikanten Zusammenhang zwischen den formulierten Aussagen nach dem Modell und Experiment. Die restlichen Hypothesen und ihre Überprüfungen werden in den Gruppen scheinbar unabhängig voneinander getätigt. Es stellt sich

Tabelle 29: Korrelationen der Kernhypothesen und ihrer Überprüfung im Rahmen des Vergleichs zwischen Modell und Experiment

| Hypothese Überprüfung | Brechung | Brechungs- index | keine Brechung | Lichtweg durch die Mitte | Total- reflexion |
|--------------------------|----------|---------------------|-------------------|-----------------------------|---------------------|
| Brechung | . | -.210 | . | . | -.269 |
| Brechungsindex | -.334* | . | . | . | . |
| keine Brechung | . | .279 | -.212 | . | . |
| Lichtweg durch die Mitte | . | . | . | . | . |
| Totalreflexion | . | . | -.258 | . | .346* |

Anmerkung. * $p < .05$, Korrelationskoeffizienten unter .20 werden nicht angegeben.

zudem heraus, dass diejenigen, die nach dem Modell etwas zu Brechung allgemein geschrieben haben, eher seltener nach dem Experiment auf den Einfluss des Brechungsindex auf die Brechung eingehen. Eine sinnvolle inhaltliche Interpretation der Zusammenhänge zwischen einer Hypothese und der Überprüfung bzw. nicht Überprüfung einer anderen Hypothese fällt an dieser Stelle jedoch schwer.

Zuletzt wird nach Zusammenhängen zwischen den Merkmalen der Arbeit mit dem Modell sowie des Experimentierens und den nach dem Experiment formulierten Unterschieden gesucht, die sich in die Reflexion der Eigenschaften des Modells und des Experiments aufteilen (siehe Tabelle 30). Die Ergebnisse werden hier jedoch stark von Ausreißern beeinflusst, bei denen die jeweilige Reflexion besonders stark ausgeprägt ist, sodass die Faktorwerte dieser Gruppen einen großen Abstand zum Rest aufweisen. Werden diese von der Berechnung ausgeschlossen, ergibt sich ein Bild, welches eher für den Großteil der Stichprobe spricht. Bezüglich der Reflexion liegt daraufhin ein starker Zusammenhang zwischen der Fokussierung auf das Modell und den im Experiment erreichten Zielen vor, von denen ein größerer Teil der Vorbereitung der Messung dient. Das wiederum kontraintuitive Ergebnis lässt sich so interpretieren, dass gerade die ausführliche Beschäftigung mit dem Experiment und seinen Bestandteilen die hinreichende Bedingung für das Erkennen von im Modell verankerten Unterschieden ist. Die Arbeit mit dem Modell müsste dafür logischerweise die notwendige Bedingung darstellen. Dafür finden sich in den Daten jedoch keine Hinweise. Obwohl die restlichen Zusammenhänge nicht signifikant sind, sieht es so aus, dass eine eher oberflächliche Beschäftigung mit dem Experiment zur Formulierung von Aussagen verleitet, die sich auf die im Experiment offensichtlich vorliegenden Unterschiede beschränken.

4.4.4 Verhaltensmuster

Vor allem in den Sozial- und Wirtschaftswissenschaften werden objektive und nachvollziehbare Verfahren zur Abgrenzung homogener Gruppen innerhalb einer Gesamtheit von Beobachtungen benötigt. Es handelt sich dabei um Personen oder Produkte, die untereinander ähnliche Ausprägungen bezüglich festgelegter Eigenschaften aufweisen. Gleichzeitig unterscheiden sich ihre Werte stark von den Werten anderer Subjekte oder Objekte innerhalb der Stichprobe. Dadurch werden beispielsweise Personengruppen identifiziert, die gemeinsame Vorlieben

4 Dynamische Modelle im Praktikum der Optik

oder Verhaltensmuster aufweisen, sodass auf die Gruppe zugeschnittene Maßnahmen realisiert werden können. Solche Verfahren werden als *Clusteranalyse* bezeichnet. Clusteranalysen gehören zur Gruppe der explorativen Analysetechniken, da sich die gebildeten Cluster nicht zwangsläufig signifikant voneinander unterscheiden. Außerdem hängen die Ergebnisse stark davon ab, welche Eigenschaften mit welchem Verfahren gruppiert werden. In der wissenschaftlichen Praxis hat sich die hierarchische Clusteranalyse mit dem Verfahren nach Ward (1963) durchgesetzt. In der Regel gibt es einen Spielraum, wie viele Cluster als Ergebnis vorliegen. Je mehr Personen zu einem Cluster hinzugefügt werden, desto höher werden die Unterschiede innerhalb des Clusters. Der sprunghafte

Tabelle 30: Korrelationen der formulierten Unterschiede mit den Merkmalen der Arbeit mit dem Modell und des Experimentierens

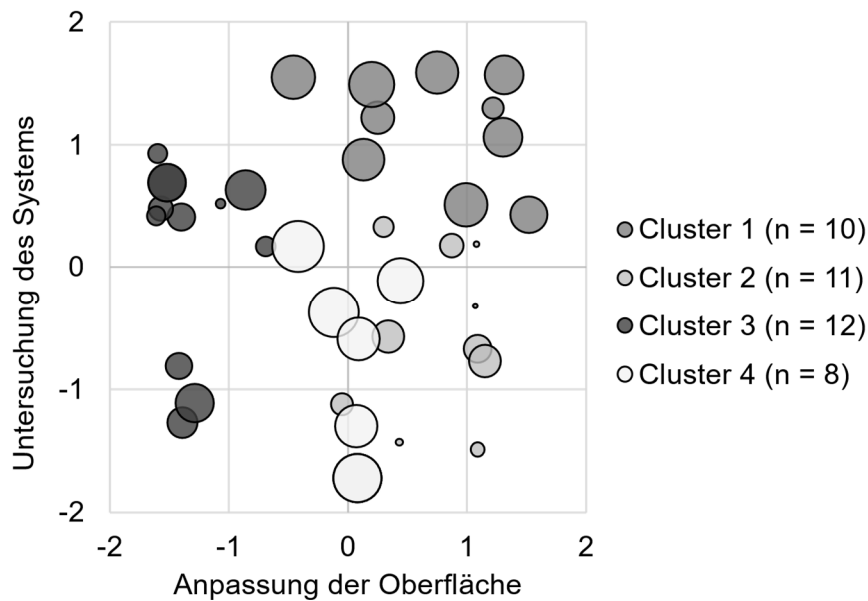
| | Reflexion des Experiments | Reflexion des Experiments ^b | Reflexion des Modells | Reflexion des Modells ^c |
|--|---------------------------|--|-----------------------|------------------------------------|
| Zeit mit dem Modell ^a | . | . | . | -.237 |
| Ziele des Modells | . | . | .272 | . |
| Anpassung der Oberfläche (Modell) | . | . | .243 | . |
| Veränderung der Eigenschaften (Modell) | .337 | . | . | .249 |
| Untersuchung des Systems (Modell) | -.231 | . | . | . |
| Zeit mit dem Experiment ^a | . | -.286 | . | . |
| Ziele des Experiments | -.302 | -.315 | . | .525* |
| Vorbereitung der Messung (Exp.) | . | -.266 | . | .566* |
| Durchführung der Messung (Exp.) | . | . | -.715** | . |
| Untersuchung des Systems (Exp.) | . | . | . | . |

Anmerkung. ** $p < .01$, * $p < .05$, Korrelationskoeffizienten unter .20 werden nicht angegeben.

a. Rangkorrelation nach Spearman

b. ohne Ausreißer 3/4 und 23/24, $n = 18$

c. ohne Ausreißer 25/26, $n = 19$



Anmerkung. Die Blasengröße entspricht der Ausprägung in der dritten Komponente *Veränderung der Eigenschaften* von -1.47 bis 1.87.

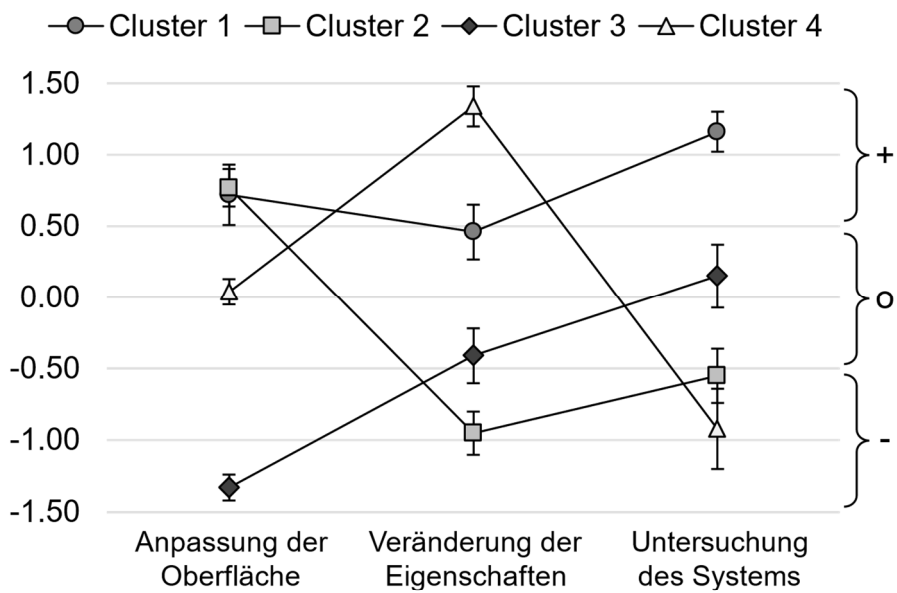
Abbildung 38: Blasendiagramm der vier Cluster zu den drei Faktoren der Arbeit mit dem Modell

Anstieg der Heterogenität gilt als anerkanntes „Stopp-Kriterium“ und wird mithilfe eines Dendrogramms festgestellt (Cleff, 2015c, S. 201).

Im Zentrum der Untersuchung steht die Arbeit mit dem Modell, sodass die zuvor per Hauptkomponentenanalyse ermittelten drei Faktoren *Anpassung der Oberfläche*, *Veränderung der Eigenschaften* und *Untersuchung des Systems* als standardisierte Variablen einer Clusteranalyse herangezogen werden. Das Ziel besteht darin, innerhalb der Stichprobe Personengruppen (im Folgenden Cluster) zu identifizieren, die untereinander ein ähnliches Verhalten aufweisen, das durch die drei Faktoren charakterisiert wird. Im Dendrogramm in Abbildung 75 im Anhang sind die hierarchisch (Schritt-für-Schritt) zu Clustern zusammengefassten Beobachtungen (Personen) gegen die berechneten Unterschiede innerhalb der Cluster aufgetragen. Der sprunghafte Anstieg der Unterschiede beim Übergang von fünf zu vier Clustern deutet auf eine Lösung mit vier Clustern hin.

In Abbildung 38 ist das Ergebnis der Clusteranalyse als Blasendiagramm dargestellt. Die Ausprägungen in den zwei Faktoren werden an den Achsen aufgetragen und die Blasengröße entspricht der Ausprägung des dritten Faktors. Cluster 1 zeichnet sich dadurch aus, dass die Datenpunkte oben rechts liegen und einen relativ großen Durchmesser aufweisen. Alle drei Faktoren sind somit eher überdurchschnittlich ausgeprägt. Die Punkte von Cluster 2 liegen auch auf der

4 Dynamische Modelle im Praktikum der Optik



Anmerkung. Die Fehlerbalken entsprechen dem Standardfehler des Mittelwerts. Mittelwerte größer als 0.50 werden als überdurchschnittlich (+), kleiner als -0.50 als unterdurchschnittlich (-) und dazwischen als durchschnittlich eingestuft (o).

Abbildung 39: Profillinien der vier Cluster zu den Komponenten der Arbeit mit dem Modell

rechten Seite, aber weiter unten und haben kleinere Durchmesser. Sie unterscheiden sich in zwei Faktoren deutlich von Cluster 1. Etwas weiter links befinden sich die Punkte von Cluster 4, aber diese weisen wesentlich größere Durchmesser auf. Somit unterscheiden sie sich in einem Faktor deutlich von Cluster 2. Die Punkte von Cluster 3 verteilen sich von oben nach unten und haben unterschiedliche Durchmesser. Sie unterscheiden sich von den anderen Clustern vor allem dadurch, dass sie auf der linken Seite versammelt sind – also in einem Faktor durchwegs unter dem Durchschnitt liegen. Die Aufteilung in vier Cluster erscheint deshalb insgesamt gerechtfertigt.

In Abbildung 39 sind die Mittelwerte der Cluster in den drei Faktoren als Profillinien dargestellt, sodass die Unterschiede deutlicher hervorstechen und anhand der Fehlerbalken eine grobe Abschätzung bezüglich der Bedeutsamkeit der Unterschiede gemacht werden kann.⁵⁴ Cluster 1 ist überdurchschnittlich bei *Anpassung der Oberfläche* (Faktor 1) und als einzige Gruppe auch überdurchschnittlich

⁵⁴ Aufgrund der geringen Stichprobengrößen der Cluster werden keine Varianzanalysen durchgeführt.

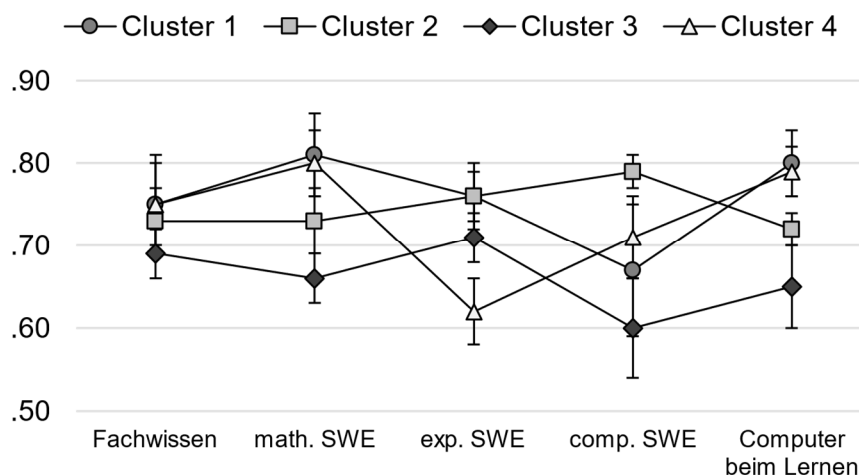
bei *Untersuchung des Systems* (Faktor 3). Lediglich bei *Veränderung der Eigenschaften* (Faktor 2) werden in Cluster 4 höhere Werte erreicht. Die insgesamt hohen Ausprägungen in allen drei Faktoren sprechen für eine *gründliche* Arbeit mit dem Modell, bei der alle angebotenen Möglichkeiten des Modells ausgenutzt werden. Im Vergleich dazu erreicht Cluster 2 im Durchschnitt denselben Wert bei Faktor 1, ist aber unterdurchschnittlich in den anderen zwei Faktoren. Das steht für eine eher *ziellose* Arbeit mit dem Modell, da sich die Handlungen vor allem auf nicht lernrelevante Aspekte wie z. B. das Ein- und Ausblenden der Winkelscheibe beschränken. Cluster 3 ist – zumindest was diesen Faktor angeht – das genaue Gegenteil. Diese Personen beschäftigen sich am wenigsten mit der Anpassung der Oberfläche des Modells. In den anderen Faktoren liegen die Werte jedoch im durchschnittlichen Bereich, sodass diese Arbeit mit dem Modell als *verhalten* charakterisiert werden kann. Cluster 4 erreicht im Schnitt den niedrigsten Wert in Faktor 3 und den höchsten in Faktor 2, während Faktor 1 durchschnittlich ist. Das spricht für eine *einseitige* Arbeit mit dem Modell, da nur der Einfluss des Brechungsindex auf die Brechung untersucht wurde und nicht das System als Ganzes, was durch verschiedene Lichtwege durch die Halbkreis-scheibe charakterisiert wird.

Die Verhaltensmuster machen sich auch in den Zeiten erkennbar, die im Durchschnitt mit dem Modell verbracht werden. Cluster 1 weist erwartungsgemäß den größten Wert in Sekunden auf (ohne Ausreißer 2, $n = 9$, $M = 430$, $SD = 163$).⁵⁵ Während sich die Zeit in Cluster 3 und 4 fast halbiert (Cluster 3, $n = 12$, $M = 223$, $SD = 77$; Cluster 4, ohne Ausreißer 39, $n = 7$, $M = 218$, $SD = 103$). Cluster 2 erreicht einen Wert, der dazwischen liegt (ohne Ausreißer 30, $n = 10$, $M = 319$, $SD = 156$). Im Folgenden wird untersucht, inwiefern eine *gründliche* (Cluster 1), *ziellose* (Cluster 2), *verhaltene* (Cluster 3) oder *einseitige* (Cluster 4) Arbeit mit dem Modell sich in den lernbezogenen Merkmalen erkennbar macht oder auf die Hypothesenbildung niederschlägt.

In Abbildung 40 sind die Mittelwerte verschiedener Merkmale der vier Cluster als Profillinien dargestellt. In den meisten individuellen Lernvoraussetzungen wie z. B. dem Fachwissen liegen die Werte nah beieinander, sodass sich auch die

⁵⁵ Die im Folgenden angegebenen Ausreißer beziehen sich auf die Verteilung der Werte innerhalb eines Clusters. Es handelt sich dabei um einzelne Werte, die weit abseits der restlichen Werte liegen. Symmetrisch verteilte Ausreißer – also Wertepaare, die eine größere Abweichung nach oben und unten von den restlichen Werten aufweisen – werden nicht ausgeschlossen. Das Vorgehen verhindert die Verzerrung des generellen Trends durch Extremfälle in einer kleinen Stichprobe und erhält gleichzeitig die im Datensatz vorliegende Varianz aufrecht.

4 Dynamische Modelle im Praktikum der Optik

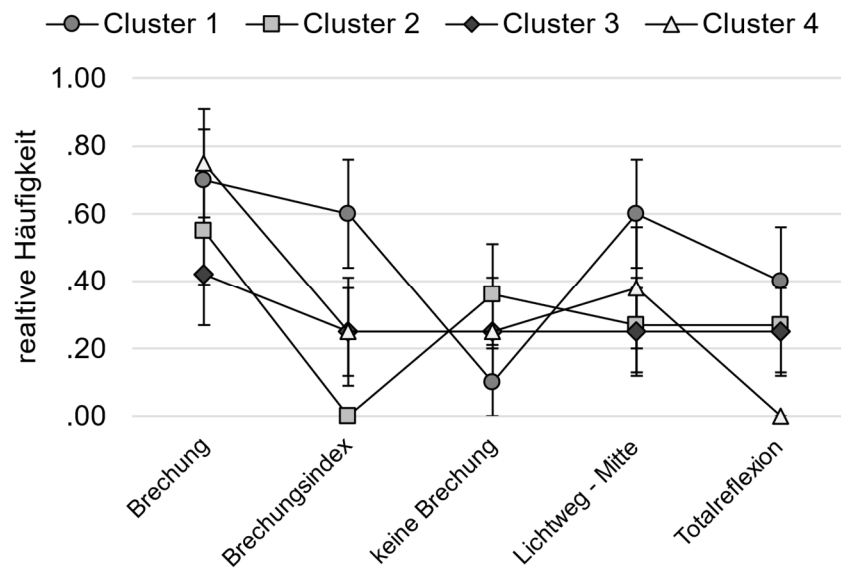


Anmerkung. Die Fehlerbalken entsprechen dem Standardfehler des Mittelwerts. Der Mittelwert der comp. SWE für Cluster 2 wird ohne Ausreißer 9 angegeben ($n = 10$). Der Mittelwert der exp. SWE für Cluster 4 wird ohne Ausreißer 8 angegeben ($n = 7$).

Abbildung 40: Profillinien der vier Cluster zu den lernbezogenen Merkmalen

Fehlerbereiche überlagern. In diesen erhobenen Merkmalen scheinen sich die Cluster nicht wesentlich voneinander zu unterscheiden. In manchen Merkmalen gibt es allerdings einzelne Cluster, die im Vergleich zu anderen einen auffällig niedrigen oder hohen Wert aufweisen. Diese Auffälligkeiten lassen sich als besondere Merkmale dieser Cluster interpretieren. Im Vergleich zum Fachwissen liegen bei den verschiedenen SWE zwischen den Clustern deutlichere Unterschiede vor. Cluster 3 zeichnet sich durch niedrige Werte bei der mathematischen und computerbezogenen SWE sowie der Einstellung zum Lernen mit dem Computer aus, was die *verhaltene* Arbeit mit dem Modell erklären kann. Cluster 4 zeigt hingegen deutlich niedrigere Werte bei der experimentierbezogenen SWE, was wiederum eine *einseitige* und damit unzureichende Untersuchung des dynamischen Modells nach sich ziehen kann. In den anderen Merkmalen unterscheidet sich Cluster 4 ansonsten nicht wesentlich von Cluster 1, das bis auf die computerbezogene SWE die höchsten Werte erreicht. Dort schneidet bemerkenswerterweise Cluster 2 am besten ab, was mit der hohen Ausprägung des Faktors *Anpassung der Oberfläche* des Modells einhergeht. Allerdings scheint das und die hohe experimentierbezogene SWE keine Garantie vor einer *ziellosen* Arbeit mit dem Modell zu sein.

Beim Vergleich der Anzahl der formulierten Kernhypothesen pro Person im Cluster stellt sich heraus, dass Cluster 1 die meisten Hypothesen formuliert hat



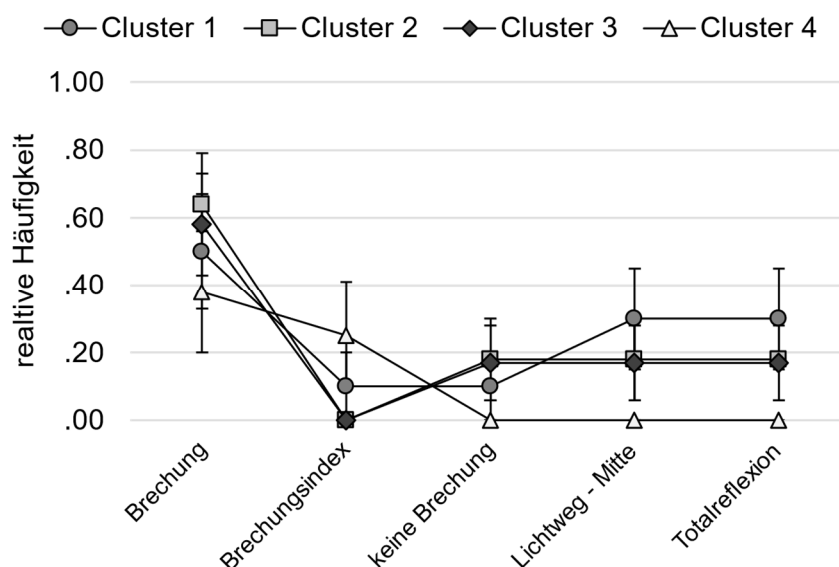
Anmerkung. Die Fehlerbalken entsprechen dem Standardfehler der relativen Häufigkeit.

Abbildung 41: Profillinien der vier Cluster zu den Kernhypothesen

($M = 2.40$, $SD = 0.84$).⁵⁶ Mit etwas Abstand folgen ohne größere Unterschiede die Cluster 4 ($M = 1.63$, $SD = 0.74$), 2 ($M = 1.45$, $SD = 0.69$) und 3 ($M = 1.42$, $SD = 1.00$). In Abbildung 41 sind die relativen Häufigkeiten der Kernhypothesen in den Clustern als Profillinien dargestellt. Wiederum können vereinzelt Auffälligkeiten beobachtet werden. Innerhalb von Cluster 1 erreichen inhaltlich relevante Kernhypothesen zum Lichtweg durch die Mitte der Halbkreisscheibe (KH4) und zum Einfluss des Brechungsindex auf die Brechung hohe Werte (KH2). Obwohl sich Cluster 4 mit der *Veränderung der Eigenschaften* des Modells am meisten beschäftigt hat, gehen die Personen in Cluster 1 häufiger auf den Einfluss des Brechungsindex auf die Brechung ein. Cluster 2, das sich mit dem Schieberegler zum Brechungsindex am wenigsten beschäftigt hat, formuliert folgerichtig keine einzige Hypothese zu diesem Sachverhalt. Das trifft auch auf Cluster 4 bezüglich der Hypothese zur Totalreflexion zu, das sich am wenigsten mit den verschiedenen Lichtwegen durch die Halbkreisscheibe beschäftigt hat (Faktor 3) und deshalb keine Beobachtungen dazu machen konnte. Insgesamt lässt sich ein Zusammenhang zwischen der Zugehörigkeit zu verschiedenen Clustern und der Fähigkeit erkennen, aufgrund der Erfahrungen und Beobachtungen während der Arbeit mit dem Modell physikalische Hypothesen zu formulieren.

⁵⁶ Die maximale Anzahl liegt bei fünf Kernhypothesen.

4 Dynamische Modelle im Praktikum der Optik



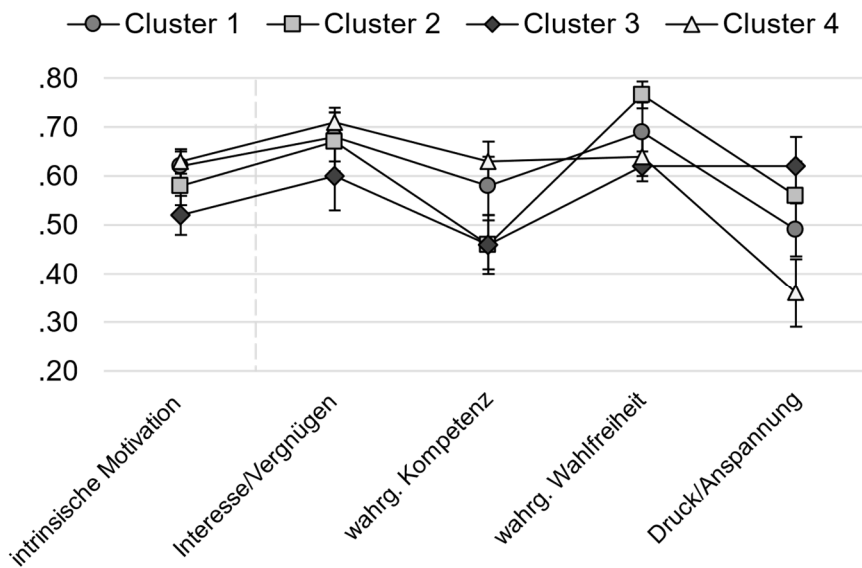
Anmerkung. Die Fehlerbalken entsprechen dem Standardfehler der relativen Häufigkeit.

Abbildung 42: Profillinien der vier Cluster zur Überprüfung der Kernhypothesen

Mit den gleichen Methoden können Unterschiede zwischen den Clustern in Bezug auf die Überprüfung der Kernhypothesen untersucht werden. Cluster 1 erreicht wiederum die größte Zahl protokollierter Gemeinsamkeiten pro Person ($M = 1.30$, $SD = 0.17$). Cluster 2 und 3 erreichen ähnliche Werte ($M = 1.18$, $SD = 0.24$; $M = 1.09$, $SD = .22$), während Cluster 4 im Schnitt nur die Hälfte des Werts von Cluster 1 erreicht ($M = 0.63$, $SD = 0.18$). Werden die relativen Häufigkeiten im Einzelnen betrachtet (siehe Abbildung 42), sticht nach dem Experiment wiederum Cluster 1 mit höheren Werten bezüglich der Aussagen zum Lichtweg durch die Halbkreisscheibe und zur Totalreflexion leicht hervor. Die Studierenden im Cluster 4, die den Lichtweg im Modell nicht untersuchten, notieren auch nach dem Experiment diesbezüglich keine Gemeinsamkeiten. Stattdessen schreiben sie häufiger etwas zum Brechungsindex des Materials, wobei dieser im Experiment nicht variiert werden kann.

Schließlich wird untersucht, inwiefern sich die Verhaltensmuster auf die berichtete intrinsische Motivation ausgewirkt haben bzw. sich mithilfe der verschiedenen Skalen erklären lassen können. Die über alle Skalen hinweg gemittelten Werte liegen zwar nah beieinander, aber es lässt sich ein kleiner Abstand von Cluster 3 zum Rest der Stichprobe erkennen (siehe Abbildung 43). Die als *verhalten* eingestufte Arbeit mit dem Modell korrespondiert mit der im Vergleich zu

4 Dynamische Modelle im Praktikum der Optik



Anmerkung. Die Fehlerbalken entsprechen dem Standardfehler des Mittelwerts. Der Mittelwert der intrinsischen Motivation für Cluster 4 wird ohne Ausreißer 8 angegeben ($n = 7$). Der Mittelwert der wahrg. Kompetenz für Cluster 2 wird ohne Ausreißer 29 angegeben ($n = 11$). Der Mittelwert zu Druck/Anspannung für Cluster 1 wird ohne Ausreißer 23 angegeben ($n = 9$).

Abbildung 43: Profillinien der vier Cluster zu den Skalen der intrinsischen Motivation

anderen Clustern niedrigeren intrinsischen Motivation der Studierenden. Das trifft insbesondere auf die Skalen *Interesse/Vergnügen* und *Druck/Anspannung* zu. Bei der Skala zur *wahrgenommenen Kompetenz* erreicht Cluster 2 einen ähnlich niedrigen Wert. Gleichzeitig gibt Cluster 2 die höchste *wahrgenommen Wahlfreiheit* an, was gerade bei diesen Personen zu Schwierigkeiten und einem eher *planlosen* Vorgehen geführt hat. Das hat sich jedoch nicht negativ auf das generelle Interesse ausgewirkt, mit dem Modell zu arbeiten. Cluster 4 berichtet hingegen weniger Wahlfreiheit wahrgenommen zu haben, was den *einseitigen* Umgang mit dem Modell erklärt. In den übrigen Skalen erreichen diese Personen jedoch die höchsten Werte der intrinsischen Motivation und verspüren den mit Abstand niedrigsten Druck. Cluster 1 sticht in keiner Skala deutlich hervor, erreicht aber hohe Werte und gibt gleichzeitig an, einen moderaten Druck zu verspüren, was die *gründliche* Arbeit mit dem Modell begünstigt bzw. begründet haben könnte.

4.5 Diskussion

Das Ziel der explorativen Untersuchung war es, Lernende bei der Arbeit mit einem dynamischen Modell in einer authentischen Lernumgebung zu beobachten sowie den Lernprozess und die Lernprodukte zu beschreiben und einzuordnen. In diesem Zuge sollte vor allem untersucht werden, inwieweit Hypothesen als Ergebnis der Arbeit mit dem dynamischen Modell formuliert und direkt im Anschluss in einem Experiment überprüft werden können. Dementsprechend wurden Forschungsfragen formuliert. Ein dynamisches Modell zur Lichtbrechung an der Halbkreisscheibe diente als Lernmedium zur Vorbereitung eines üblichen Versuchstages im Praktikum der Optik.

Der Untersuchungsgegenstand und die Forschungsfragen erfordern einen Mixed-Methods-Ansatz, da sowohl qualitative Lernprozesse und Lernprodukte als auch quantitativ erhobene Merkmale miteinander in Bezug gesetzt werden müssen. Obwohl der überwiegende Teil der Daten qualitativ ist, lag der methodische Schwerpunkt am Ende der Datenauswertung auf der quantitativen Seite. Die Analyse und Kategorisierung der Daten mithilfe von qualitativen Methoden lieferte als Zwischenschritt inhaltliche Ergebnisse, die (a) in Form von Häufigkeiten verglichen, (b) zu Faktoren zusammengefasst und (c) mit anderen qualitativen und quantitativen Daten in Zusammenhang gebracht wurden. In der folgenden Zusammenfassung werden die Ergebnisse in komprimierter Form aufgegriffen, um auf die Forschungsfragen aus Kapitel 4.1 einzugehen. Darauf aufbauend werden Erkenntnisse in Bezug auf die physikalische Modellbildung mit dynamischen Modellen formuliert, die mithilfe der Studie gewonnen werden konnten (siehe Kapitel 4.5.1). Des Weiteren werden die Erkenntnisse in Anbetracht der Einschränkungen diskutiert (siehe Kapitel 4.5.2), um abschließend Gestaltungsempfehlungen für dynamische Modelle abzuleiten (siehe Kapitel 4.5.3).

4.5.1 Zusammenfassung und Interpretation

Um die Frage nach dem Vorgehen der Lernenden bei der Arbeit mit dem dynamischen Modell zu beantworten (siehe Forschungsfrage 1 in Kapitel 4.1), wurden Videoaufnahmen angefertigt und zunächst so analysiert, dass die Handlungen der Studierenden einer Reihe von möglichen Zielen zugeordnet wurden. Sie umfassen durchführbare Veränderungen und auch spezifische Konstellationen, die im Modell im Hinblick auf das nachfolgende Experiment eingestellt werden können. Mit diesem Vorgehen konnte zum einen geklärt werden, welche Bestand-

teile die Studierenden wie stark variieren. Zum anderen repräsentierte die Zielkategorie der betrachteten Einstellungen auch inhaltliche Zusammenhänge. Es konnte zunächst gezeigt werden, dass die drei Zielkategorien (a) *Bestandteile variieren*, (b) *Randbereiche untersuchen* und (c) *messbezogene Einstellungen vornehmen* mit abnehmender Häufigkeit erfüllt werden. Zwar nimmt die Mehrheit der Lernenden Variationen am Modell vor, allerdings werden dadurch die inhaltlichen Erwartungen nicht per se erfüllt. Das Lernangebot, Zusammenhänge in einem physikalischen System durch freie Exploration eines dynamischen Modells zu untersuchen, war für die meisten Studierenden neu und wurde mit unterschiedlicher Beharrlichkeit angenommen. Das hat sich in der großen Streuung der in die Arbeit mit dem Modell investierten Zeit gezeigt. Allerdings konnte in der Studie auch beobachtet werden, dass eine längere Lernzeit in der Regel mit einer höheren Zieldichte einhergeht. Aus den im Modell angelegten und von den Studierenden verfolgten Zielen konnten im nächsten Schritt voneinander unabhängige, allgemeine Faktoren der Arbeit mit einem dynamischen Modell abgeleitet werden:

- Anpassung der Oberfläche des Modells
- Veränderung der Eigenschaften des Modells
- Untersuchung des im Modell abgebildeten Systems

Die resultierenden Faktoren lassen sich in primäre und sekundäre Handlungen bei der Arbeit mit dem Modell einteilen. Wünschenswert wären vor allem Handlungen, die zur ausgiebigen Untersuchung des Systems gehören, um die im Modell angelegten Zusammenhänge eigenständig entdecken zu können (primär). Die restlichen im Modell angelegten Handlungen ermöglichen zwar grundsätzliche Anpassungen oder weitergehende Veränderungen des Modells (sekundär), sie haben jedoch auch das Potenzial, Lernende von der Untersuchung des Systems abzulenken. Mithilfe der Ausprägungen der drei Faktoren wurden schließlich vier Verhaltensmuster der Arbeit mit einem dynamischen Modell identifiziert, die als *gründlich*, *ziellos*, *verhalten* und *einseitig* charakterisiert werden können (Cluster 1 bis 4).

| | |
|--------------|--|
| Erkenntnis 1 | Um die Anzahl potenzieller Handlungen zur Untersuchung des modellierten Systems zu steigern, sollten Möglichkeiten zur Anpassung der Oberfläche oder Veränderung einzelner Eigenschaften des dynamischen Modells reduziert werden. |
|--------------|--|

4 Dynamische Modelle im Praktikum der Optik

In der weiteren Auswertung konnten mithilfe von Zusammenhangsanalysen Hinweise gefunden werden, dass eine hohe Ausprägung im zweiten und vor allem im dritten Faktor für einen erfolgreichen Umgang mit dem dynamischen Modell steht. Dieser macht sich durch das Formulieren von Hypothesen bemerkbar, die dem angedachten Lerninhalt des dynamischen Modells entsprechen (siehe Forschungsfrage 2 in Kapitel 4.1). Die Antworten der Studierenden wurden in mehreren Schritten kategorisiert. Aus anfänglich 15 Kategorien wurden schließlich fünf inhaltlich weitestgehend unabhängige Kernhypothesen gebildet. Während triviale Aussagen zur Lichtbrechung (KH1) unabhängig von der Untersuchung des Modells getätigt wurden, enthalten die Daten Verbindungen zwischen komplexeren Aussagen zum Lichtweg (KH4 und KH5) und den im Modell untersuchten Situationen (Faktor 3). Die Personen, die den Brechungsindex im Modell bewusst variierten (Faktor 2), formulierten häufiger Aussagen zur Brechung allgemein und zum Einfluss des Brechungsindex (KH1 und KH2). Während die Aussagen zur Totalreflexion (KH5) vor allem von Studierenden mit einem höheren Fachwissen und triviale Aussagen (KH1) eher von Studierenden mit einem niedrigeren Fachwissen getätigt wurden, konnte bezüglich des spezifischen Lichtwegs durch die Halbkreisscheibe (KH4) kein Zusammenhang zum Vorwissen hergestellt werden. Obwohl aus Zusammenhängen keine Kausalitäten geschlossen werden können, ist die Überlegung naheliegend, dass die Arbeit mit dem Modell die Studierenden zur Formulierung dieser Hypothese animiert hat. Der in den Verhaltensmustern differenzierte Umgang mit dem Modell liefert zusätzliche Hinweise darauf, welche Aussagen in den nachfolgenden Phasen auf die Arbeit mit dem Modell zurückgeführt werden können. Die gründliche Arbeit mit dem Modell, die sich durch eine hohe Ausprägung in allen drei Faktoren und insbesondere im dritten Faktor auszeichnet (Cluster 1), ist auch das Verhaltensmuster mit der größten Häufigkeit an dem Lerninhalt entsprechenden Hypothesen (KH2 und KH4). Zu diesem Cluster können 24 % der Stichprobe gezählt werden. Der Anteil der Studierenden, die zu den gewünschten Erkenntnissen gelangt sind, beträgt 27 % für KH2 und 37 % für KH4.

Erkenntnis 2 Handlungen zur Untersuchung des modellierten Systems steigern die Wahrscheinlichkeit, dass komplexere Hypothesen nach der Arbeit mit dem dynamischen Modell formuliert werden.

Die Arbeit mit dem dynamischen Modell und die Formulierung von Hypothesen diente der Vorbereitung eines Experiments im Praktikum, sodass die Auswirkun-

gen auf die Experimentierphase ebenfalls untersucht wurde (siehe Forschungsfrage 3 in Kapitel 4.1). Da sowohl im Modell als auch im Experiment keine direkten Handlungsanweisungen gegeben und die Handlungsmöglichkeiten weitestgehend gleich gehalten wurden, konnten aus Videoaufnahmen Daten zum Experimentierprozess mit ähnlichen Analysemethoden erhoben werden. Es wurde zunächst die Frage beantwortet, inwieweit sich die Handlungen im Modell und Experiment unterscheiden bzw. decken. Die im Modell vereinzelt beobachteten Einstellungen zur Messung des Brechungswinkels in Abhängigkeit eines Einfallswinkels kamen im Experiment deutlich häufiger vor: Die korrekte Positionierung der Halbkreisscheibe auf der Winkelscheibe und die Ausrichtung der Lichtquelle auf die Mitte der Halbkreisscheibe wurden öfter beobachtet. Die Ergebnisse sprechen dafür, dass im Experiment der Schwerpunkt auf den Handlungen zum Aufbau und zur Testung der Messanordnung lag, während im Modell häufiger explorative Handlungen zur Untersuchung des Lichtwegs vollzogen wurden. Anhand der erfassten Zielkategorien konnten ebenfalls allgemeine Faktoren gewonnen werden, aus denen sich das Verhalten der Studierenden in der Experimentierphase zusammensetzt:

- Vorbereitung der Messung im Experiment
- Durchführung der Messung im Experiment
- Untersuchung des im Experiment realisierten Systems

Die übliche Gestaltung von Praktikumsversuchen im Studium besteht im Kern aus einer angeleiteten Erzeugung von Messwerten, die im ausformulierten Protokoll mit den physikalischen Grundlagen verknüpft werden sollen. Die eigenständige Untersuchung des dahinterliegenden physikalischen Systems wird selten zum Ziel gemacht. Die Ergebnisse verstärken den Eindruck, dass diese etablierte Vorgehensweise explorative Handlungen mit realen Experimentiermaterialien hemmt. Das dynamische Modell bietet anscheinend einen adäquateren Raum, bestimmte Einstellungen offen auszuprobieren.

Erkenntnis 3 Während der Umgang mit realen Experimentiermaterialien auf die Erfassung realer Messwerte abzielt, verleitet ein dynamisches Modell eher zu explorativen Handlungen.

Zu den Aktivitäten in der Experimentierphase gehört jedoch auch das Protokollieren und Reflektieren der Ergebnisse. Die Studierenden wurden deshalb aufgefordert, die im Modell visualisierten Zusammenhänge und das im Experiment beobachtete Verhalten des Lichts zu vergleichen, indem sie Gemeinsamkeiten und

4 Dynamische Modelle im Praktikum der Optik

Unterschiede aufschreiben. Die aus dem Material induktiv gebildeten Kategorien der festgestellten Gemeinsamkeiten überschneiden sich mit den Kernhypothesen, sodass Häufigkeitsvergleiche angestellt werden können. Die Auswertung hat gezeigt, dass im Modell beobachtete Zusammenhänge, die mit den gegebenen Materialien nicht überprüft werden konnten (KH2), nach dem Experiment nur vereinzelt angesprochen werden. Während andere Aussagen des Modells im Experiment bestätigt werden konnten (KH1, KH4 und KH5). Dieses Verhalten ist nicht klar ausgeprägt, da es in jeder Kategorie auch Studierende gibt, die sowohl Hypothesen ohne Überprüfung als auch Beobachtungen ohne vorherige Hypothesen aufgeschrieben haben. Allerdings sticht auch hier Cluster 1 mit einer *gründlichen* Arbeit mit dem Modell durch eine höhere Anzahl inhaltlich relevanter Aussagen nach dem Experiment heraus.

Erkenntnis 4 Die Formulierung von Hypothesen und ihre Überprüfung in einem Experiment erfolgt erst bei gründlicher Arbeit mit dem dynamischen Modell.

Des Weiteren konnte während der Experimentierphase eine Fokussierung der Aufmerksamkeit auf Unterschiede des Experiments im Vergleich zum Modell festgestellt werden. Es handelt sich um materialbedingte Nebeneffekte (scheinbar ungebrochener Lichtweg) oder um gewollte Reduktionen bei der Gestaltung des Modells (Reflexion beim Eintritt), die bei der Beschreibung des Lerninhalts bereits als Teil des Reflexionsprozesses vermutet wurden (siehe Kapitel 4.2.2). Andere Aspekte des Modells wie die vorgenommenen Idealisierungen und zusätzlichen Visualisierungen werden seltener angesprochen. Letztendlich konnten aus den Unterschieden, die die Studierenden festgestellt haben, zwei unabhängige Faktoren extrahiert werden:

- Reflexion des Experiments
- Reflexion des Modells

Allerdings konnte der auf den ersten Blick naheliegende Zusammenhang, dass eine intensive Auseinandersetzung mit dem Experiment eine ausführliche Reflexion des Experiments nach sich zieht, nicht beobachtet werden. Stattdessen wird von diesen Personen eher das im Vorfeld bearbeitete Modell reflektiert. Offenbar verdeutlicht die Untersuchung des Systems im Experiment die im Modell vorgenommenen Idealisierungen und Hilfestellungen.

Erkenntnis 5 Der intensive Umgang mit realen Experimentiermaterialien nach der Arbeit mit einem dynamischen Modell ermöglicht die Reflexion des Modells.

Die bisherigen Ergebnisse und daraus abgeleiteten Erkenntnisse basieren auf den Häufigkeiten der kategorisierten, qualitativen Beobachtungen innerhalb der Stichprobe. Im Vorfeld der Studie wurde jedoch erwartet, dass die erfassten Prozesse im Einzelnen von individuellen Lernvoraussetzungen und der Motivation der teilnehmenden Personen abhängen. Aus diesem Grund wurden weitere Merkmale quantitativ erhoben, um die qualitativ erfassten Daten einordnen zu können (siehe Forschungsfrage 4 in Kapitel 4.1). Bei den Merkmalen handelte es sich um das themenbezogene Fachwissen, diverse SWE und einzelne Skalen intrinsischer Motivation bei der Arbeit mit dem dynamischen Modell. Während die einzelnen Merkmale untereinander moderat oder stark korrelieren, konnten in der Regel nicht mehr als schwache Korrelationen zu den zuvor besprochenen Prozessvariablen verzeichnet werden. Die Ergebnisse sprechen insgesamt dafür, dass zumindest die untersuchten Merkmale für das Lernverhalten oder die Lernprodukte der Studierenden nicht ausschlaggebend waren. Beispielsweise konnte kein Merkmal identifiziert werden, dass einen direkten Einfluss auf die mit dem Modell verbrachte Zeit haben könnte. Allerdings deuten die Daten darauf, dass Personen mit einer höheren mathematischen und experimentierbezogenen SWE im Durchschnitt etwas mehr Ziele im Modell erreichen. Solche Ergebnisse sind aufgrund der geringen Stichprobengröße und der Stärke des Zusammenhangs jedoch nur als schwache Hinweise zu interpretieren. Bezogen auf den ausschlaggebenden Faktor 3, der die Untersuchung des im Modell abgebildeten Systems umfasst, gab es nur den schwachen und fast signifikanten Zusammenhang mit der experimentierbezogenen SWE. Die Verbindung gerade zu diesem Merkmal könnte jedoch bedeuten, dass eine gewisse Experimentierfreude den explorativen Umgang mit einem dynamischen Modell begünstigt. Die Skalen intrinsischer Motivation waren in dieser Hinsicht wenig aufschlussreich.

Erkenntnis 6 Fachwissen, mathematische und computerbezogene SWE sowie Merkmale intrinsischer Motivation stehen in keinem direkten Zusammenhang mit der Intensität der Untersuchung des modellierten Systems.

4 Dynamische Modelle im Praktikum der Optik

Die Unabhängigkeit der Intensität der Arbeit mit dem dynamischen Modell vom Fachwissen der Studierenden bestätigte sich auch in Bezug auf die vorgefundenen Verhaltensmuster. Bei den vier Clustern wurden keine wesentlichen Unterschiede in diesem Merkmal beobachtet. Allerdings fiel das Cluster 3 mit einem *verhaltenen* Umgang mit dem Modell durch niedrigere mathematische und computerbezogene SWE auf. Gleichzeitig konnte eine niedrigere intrinsische Motivation bei dieser Teilgruppe festgestellt werden. In Cluster 4 mit einer *einseitigen* Arbeit mit dem Modell wurde hingegen eine niedrigere experimentierbezogene SWE beobachtet. Diese Personen gaben auch an, weniger Wahlfreiheit im Umgang mit dem dynamischen Modell wahrgenommen zu haben, was die nicht genutzten Bedienungsmöglichkeiten erklärt.

Erkenntnis 7 Ungünstige Verhaltensmuster, die der gründlichen Arbeit mit einem dynamischen Modell nicht entsprechen, sind auf niedrige mathematische, computerbezogene und experimentierbezogene SWE sowie fehlende intrinsische Motivation zurückzuführen.

Die qualitative Analyse der Aussagen der Studierenden zu ihrer Motivation ergab, dass die genannten motivationsförderlichen Aspekte vor allem innerhalb der Arbeit mit dem dynamischen Modell liegen (z. B. Möglichkeit zur selbstbestimmten Exploration), während vor allem äußere Gegebenheiten die Motivation hemmen könnten (z. B. fehlende Erfahrung mit *GeoGebra*). Dennoch könnte eine überaus offene Aufgabenstellung bei einigen Lernenden zu Unsicherheiten aufgrund der Unbestimmtheit der eigenen Handlungen führen. Auf der anderen Seite wird die Arbeit mit dynamischen Modellen auch als gelungene Abwechslung zu den üblichen Lehr-Lernformen gesehen, was wie bei vielen neuen Medien zumindest kurzfristig für einen Motivationsschub sorgt (Kerres, 2003, S. 34).

Erkenntnis 8 Ein dynamisches Modell regt Lernende zu intrinsisch motivierten Handlungen an, solange das individuelle Maß an Offenheit der Aufgabenstellung eingehalten wird.

Schließlich wurde untersucht, inwiefern die verschiedenen Skalen zur intrinsischen Motivation bei der Arbeit mit dem Modell mit den formulierten Hypothesen zusammenhängen.⁵⁷ Bis auf die Kernhypothese zum Lichtweg durch die Mitte der

⁵⁷ Der Einfluss des Fachwissens auf die Formulierung bestimmter Hypothesen wurde bereits bei der Beantwortung der Forschungsfrage 2 einbezogen (siehe Erkenntnis 2).

Halbkreisscheibe (KH4) wurden keine Zusammenhänge festgestellt: Die Personen, die zu diesem speziellen Sachverhalt etwas verfasst haben, weisen im Durchschnitt eine etwas höhere wahrgenommene Kompetenz auf.

Erkenntnis 9 Die Formulierung von Hypothesen erfolgt unabhängig von der intrinsischen Motivation der Lernenden bei der Arbeit mit dem dynamischen Modell. Allerdings spiegelt sich die Entdeckung spezieller Sachverhalte mithilfe des dynamischen Modells in der eigenen Kompetenzwahrnehmung wider.

4.5.2 Einschränkungen

Die Erkenntnisse im vorherigen Kapitel sind als verallgemeinerte Kernaussagen der durchgeführten empirischen Untersuchung zu verstehen. Diesbezüglich müssen zunächst zwei Einschränkungen diskutiert werden:

- Die Ergebnisse einer explorativen Studie, die zum Teil auf Zusammenhangsanalysen basieren, werden als empirisch gestützte Hypothesen betrachtet, die es in Studien mit einem experimentellen oder quasiexperimentellen Design zu überprüfen gilt.
- Die Ergebnisse sind in einem spezifischen Studiendesign entstanden, weshalb die Erkenntnisse im Zusammenhang mit der Lernumgebung, dem Lerninhalt und der Stichprobe betrachtet werden müssen.

Die Lernumgebung orientiert sich an dem Konzept des Lernens mit Modellen und Experimenten, wie es im Rahmen der physikalischen Modellbildung in Kapitel 3 beschrieben worden ist. Es basiert auf der erkenntnistheoretischen Notwendigkeit, mentale und reale Prozesse einerseits zu trennen, andererseits miteinander in Beziehung zu setzen. Die Anwendung der idealisierten Abfolge naturwissenschaftlicher Erkenntnisgewinnung auf das Lehren und Lernen der Physik in schulischen oder universitären Lernumgebungen muss auch für die Lernenden transparent gemacht und motiviert werden. Die Daten der vorliegenden Untersuchung haben gezeigt, dass der kurze Hinweis auf den Aufbau der Lektionen nicht ausreichend gewesen ist, um bei allen Studierenden die erwarteten Handlungen hervorzurufen. Die Auswirkung des Konzepts auf Vorstellungen zur naturwissenschaftlichen Erkenntnisgewinnung (siehe These 3 in Kapitel 3.1.2) ist zudem nur bei einer regelmäßigen Anwendung des Schemas auf verschiedene Fachinhalte zu erwarten. In der vorliegenden Studie wurde diese Fragestellung deshalb nicht verfolgt.

4 Dynamische Modelle im Praktikum der Optik

Als Lerninhalt des Modells wurde ein zu untersuchendes System gewählt, das einerseits physikalische Zusammenhänge auf Schulniveau wiedergibt, andererseits relevante Beobachtungen für die nachfolgende Messanordnung zulässt. Da keine genauen Handlungsschritte vorgegeben waren, lag der Fokus vieler Studierender sowohl bei der Arbeit mit dem Modell als auch bei der Formulierung der Hypothesen auf den eher trivialen Zusammenhängen. Handlungen zur Untersuchung des Systems wie das Anstrahlen der Mitte der Halbkreisscheibe oder die korrekte Positionierung der Winkelscheibe, die zur Entdeckung der Besonderheit der geometrischen Form geführt hätten, könnten auf diese Weise in den Hintergrund geraten sein. Die Aufmerksamkeit der Studierenden weckten stattdessen überraschende, aber eher nebensächliche Beobachtungen, wie z. B. die fehlende Totalreflexion im Modell oder der geradlinig verlaufende Strahl im Experiment. Die durchschnittlichen Anteile erreichter und nicht erreichter Ziele in Anbetracht des gewählten Lerninhalts hängen somit stark von den gestalterischen Entscheidungen bei der Konstruktion des dynamischen Modells oder Zusammenstellung des Experiments ab. Dazu gehören die zum Modell und Experiment zur Verfügung gestellten Instruktionen und die im Modell und Experiment bestehenden Handlungsmöglichkeiten.

Die Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf den schulischen Kontext hängt insbesondere von der Stichprobe ab. Die Behauptung, dass die Untersuchung des Systems in einem dynamischen Modell eine Voraussetzung für die Formulierung komplexer Hypothesen ist (siehe Erkenntnis 2), lässt sich vermutlich auch auf Lernende der Sekundarstufen I und II übertragen. Andererseits sind die Beobachtungen zur Durchführung des Experiments mit großer Wahrscheinlichkeit von den üblichen Abläufen und der Einstellung der Studierenden im physikalischen Praktikum geprägt. Hinzu kommt der Einfluss auf die Ergebnisse, der durch die für diese Art der Untersuchung notwendige direkte Beobachtung der Handlungen der Studierenden entstand. Das hat zumindest bei einem Teil der Stichprobe für ein gewisses Maß an Druck gesorgt, was die eher verhaltene Arbeit mit dem Modell erklären konnte (siehe Cluster 3 in Kapitel 4.4.4).

Für die weitere Einordnung der Erkenntnisse müssen die methodischen Entscheidungen reflektiert werden, die einen Einfluss auf die Daten und daraus abgeleiteten Ergebnisse hatten. Das Studiendesign wurde weitestgehend an die Gegebenheiten des Praktikums angepasst, um die äußere Validität der Studie in Bezug auf einen fortwährenden Einsatz von dynamischen Modellen zur Vorbereitung von Experimenten im Praktikum zu gewährleisten. Das hatte u. a. zur Folge,

dass ein Wechsel der Sozialform zwischen der Arbeit mit dem Modell und der Durchführung des Experiments stattfand. Dieser Schritt senkt jedoch die innere Validität der Studie in den Teilen der Auswertung, in denen Handlungen von Einzelpersonen am Modell mit den Handlungen innerhalb der Gruppenarbeit im Experiment in Beziehung gesetzt wurden. Das hat dazu geführt, dass weniger aussagekräftige Ergebnisse zum Experiment an sich und zu etwaigen Zusammenhängen vorliegen.

Des Weiteren hatten die Entscheidungen bezüglich der Erfassung und Kategorisierung der Handlungen im Modell und Experiment einen Einfluss auf die Art der möglichen Ergebnisse. Es wurde ein systematisches Vorgehen etabliert, das nach standardisierten Kriterien die Frage beantworten kann, ob in einer bestimmten Phase ein bestimmtes Ereignis eingetreten ist oder nicht. Dieser Zugang lies bereits eine Fülle an Analysen zu, die zur Beantwortung der explorativen Forschungsfragen beigetragen haben. Es handelt sich hierbei um eine Information der ersten Ordnung, die einige Fragen bezüglich der im Modell und Experiment erreichten Ziele außer Acht lässt:

- Wann wurde das Ziel erreicht?
- Wie lange wurde auf das Ziel hingearbeitet?
- Wie oft wurde dasselbe Ziel ggf. mehrfach erreicht?
- In welcher Reihenfolge wurden die Ziele erreicht?

Allerdings richten sich die Methoden bei der Datenerfassung in wissenschaftlichen Arbeiten nicht an dem, was möglich ist, sondern daran, ob die gewonnenen Daten im Hinblick auf die Fragestellung sinnvoll interpretiert werden können. Die weiterführende Information höherer Ordnung gewährt sicherlich einen tieferen Einblick, sodass insgesamt ein höherer Detailgrad erreicht werden kann. Jedoch hängen die hier infrage kommenden Details vermutlich stärker von individuellen und zufälligen Faktoren ab, sodass sie nicht weiter erklärt werden können und im Gesamtbild eine eher untergeordnete Rolle spielen würden. Eine Studie mit mehr Probanden und einem tiefgreifenderen Blick auf die Prozesse würde dem höheren Aufwand bei der Durchführung und Auswertung erst bei einer begründeten Vermutung hinsichtlich verdeckter Strukturen gerecht werden.

Was die verwendeten quantitativen Testinstrumente und Methoden betrifft, muss zunächst der Fachwissenstest diskutiert werden. Obwohl die abgefragten Fachinhalte den benötigten bzw. behandelten Inhalten innerhalb der Lernaktivität größtenteils entsprechen, sind die Aufgaben ursprünglich für Lernende der Se-

4 Dynamische Modelle im Praktikum der Optik

kundarstufe I konzipiert und an ihren Leistungen skaliert worden. Einige Formulierungen dürften den Studierenden durch Wortwahl, Länge oder aufgrund ihrer fachlichen Abwegigkeit leicht als Distraktoren auffallen, sodass in der Stichprobe ähnlich hohe Fähigkeitswerte erhoben wurden. Außerdem konnten auch bei den meisten eingesetzten psychometrischen Skalen eher schmale Verteilungen beobachtet werden. Lediglich die computerbezogene SWE, die wahrgenommene Kompetenz und die Skala zum Druck weisen größere Varianzen auf. Das könnte die an vielen Stellen schwachen oder nicht vorhandenen Zusammenhänge der lernbezogenen und affektiven Merkmale mit den Lernprozessen und -produkten erklären: Ähnliche Ausgangsvoraussetzungen führen zu ähnlichen Handlungen, die es im Zusammenspiel mit statistischen Unsicherheiten erschweren, mögliche lineare Zusammenhänge zu beobachten.

4.5.3 Gestaltungsempfehlungen

Das in der Studie eingesetzte Modell zum Lichtweg durch eine Halbkreisscheibe wurde einerseits konstruiert, um den Studierenden die notwendigen Grundlagen für die Messung des Brechungswinkels mithilfe der üblicherweise zur Verfügung stehenden Materialien näherzubringen. Der wesentliche Lerninhalt bestand darin, die Lichtquelle stets auf die Mitte der Halbkreisscheibe zu richten, da in diesem Fall keine Brechung beim Austritt aus der Halbkreisscheibe erfolgt (siehe Kapitel 4.2.2). Dieser Sachverhalt lässt sich eigenständig entdecken, wenn die Eintrittsstelle P variiert wird und der sich dynamisch an die Änderung anpassende Lichtweg beobachtet wird. Andererseits enthielt das Modell weitere Interaktionsmöglichkeiten durch andere veränderliche Parameter, um verschiedene explorative Handlungsmöglichkeiten anzubieten und charakteristische Verhaltensmuster im Sinne der Forschungsfragen beobachten zu können (siehe Kapitel 4.1). Zusammen mit der Offenheit der Aufgabenstellung führte das allerdings dazu, dass nicht alle Studierende bei der Arbeit mit dem Modell die erwarteten Handlungen vollzogen haben und deshalb die beabsichtigten Schlüsse nicht verschriftlichen konnten (siehe Abschnitte „Ziele des Modells“ sowie „Hypothesen und Kernhypothesen“ in Kapitel 4.4.2). Diese und andere Studienergebnisse haben gezeigt, dass bei der Gestaltung von dynamischen Modellen und interaktiven Lernmedien allgemein die Größe des angebotenen Handlungsspielraums abzuwägen ist. Die Entscheidung wird von den angestrebten Lernzielen bzw. den zu fördernden Kompetenzen beeinflusst. Selbstbestimmtes Handeln ist motivierend und geeignet, um Prozessfähigkeiten zu fördern (methodische Kompetenzen), während der Aufbau des inhaltlichen Verständnisses ein gewisses Maß an

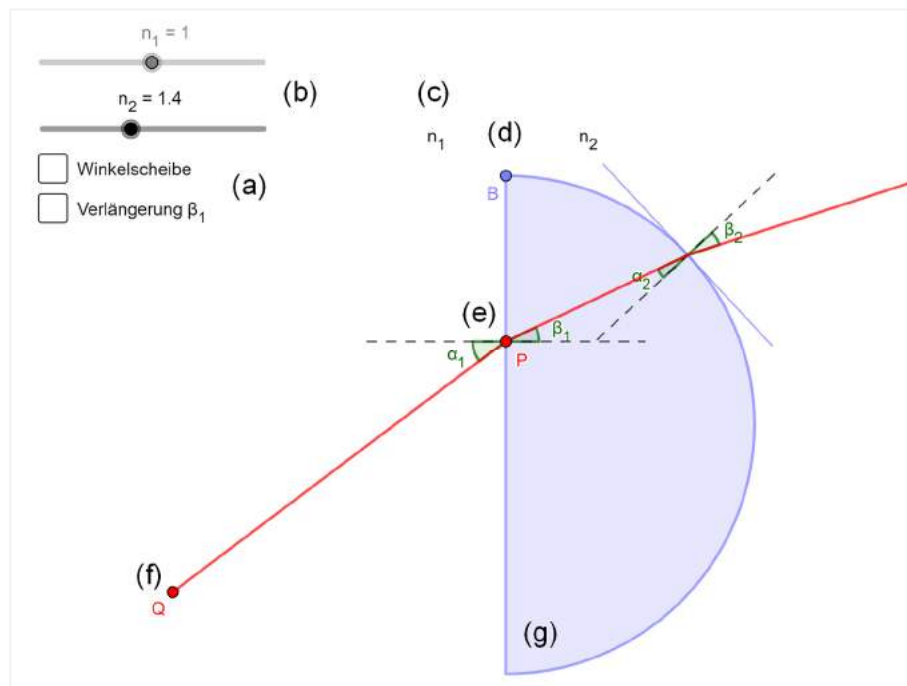


Abbildung 44: Umgestaltete Elemente (a) bis (g) des dynamischen Modells zum Lichtweg durch eine Halbkreisscheibe

Fremdbestimmung erfordert (fachbezogene Kompetenzen, siehe Kapitel 3.2.2). Das in der Studie eingesetzte Modell wurde deshalb so umgestaltet, dass es stärker auf den wesentlichen Lerninhalt fokussiert ist, aber nicht gänzlich auf selbstbestimmte, explorative Handlungen verzichtet. Folgende Elemente wurden geändert bzw. angepasst (siehe (a) bis (g) in Abbildung 44):

Die Kontrollkästchen (a) sowie ihre optionalen Funktionen wurden entfernt. Die Winkelscheibe bildet den realen Gegenstand nach, was keinen Mehrwert gegenüber dem Experiment bietet. Die Verlängerung des Brechungswinkels β_1 zeigt zwar visuell die Größe der Abweichung zwischen dem beim Austritt gebrochenen und ungebrochenen Licht bei verschiedenen Eintrittsstellen an. Diese zusätzliche Information ist jedoch in Anbetracht des wesentlichen Lerninhalts – in der Mitte gibt es keine Brechung beim Austritt – unnötig.

Die Schieberegler (b) für die Brechungsindizes wurden aus der Grafik-Ansicht des Modells entfernt. Sie können bei Bedarf in der Algebra-Ansicht, in der alle Variablen des Modells aufgelistet sind, variiert werden. Die Veränderung mithilfe der Schieberegler visualisiert den Zusammenhang zwischen den Brechungswinkeln und dem Verhältnis der Brechungsindizes der beiden Medien. Welche Bedeutung die optische Dichte eines Mediums für die Lichtausbreitung und das Verhalten des Lichts an Grenzflächen spielt, stellt allerdings ein anderes Lernziel

4 Dynamische Modelle im Praktikum der Optik

dar, das an dieser Stelle vom primären Lerninhalt des Modells ablenkt (siehe Cluster 4 in Kapitel 4.4.4). In Anlehnung an (b) werden auch die Textfelder (c) zur Kennzeichnung der Brechungsindizes der Medien entfernt.

Die Möglichkeit (d), die Größe der Halbkreisscheibe über das Verschieben von Punkt B zu variieren, wurde entfernt. Solange alle anderen Parameter kontrolliert werden, hat diese Variable keine Auswirkung auf die Eigenschaften der Halbkreisscheibe, die für die Lichtbrechung relevant wären. Diese Erkenntnis hat für sich genommen zwar auch einen Wert, ist aber vergleichsweise unbedeutend.

Die Veränderung der Eintrittsstelle (e) wird weiterhin ermöglicht, allerdings geschah dies ursprünglich über das Verschieben des Punktes P mit der Maus. Bei Geräten mit Touch-Steuerung bereitet dies jedoch Probleme, da der Finger die Grafik-Ansicht verdeckt, was eine präzise Ansteuerung einer bestimmten Stelle im Modell erschwert. Die Veränderung der Position von P entlang der flachen Seite der Halbkreisscheibe wird deshalb mithilfe eines langen Schiebereglers unterhalb des Modells realisiert.

Die Position der Lichtquelle (f) wird nicht mehr über den unabhängigen Punkt Q bestimmt, da sich sonst bei Veränderung der Eintrittsstelle gleichzeitig auch der Einfallswinkel im Modell ändert. Das entspricht zwar dem Schwenken der realen Lichtquelle im Experiment, sodass das Lichtbündel entlang der flachen Seite der Halbkreisscheibe wandert. Diese Handlung wurde auch so in vielen Videoaufnahmen des Experiments beobachtet. Das dynamische Modell sollte jedoch nicht nur die physikalischen Zusammenhänge des Systems repräsentieren, sondern auch eine angemessene Vorstellung des nachfolgenden Experimentierprozesses zur Überprüfung der Hypothese fördern. Die zeitgleiche Änderung von zwei Variablen in einem System ist im Sinne der naturwissenschaftlichen Erkenntnisgewinnung zu vermeiden. Der Einfallswinkel wird deshalb als Variable des Modells definiert und kann über einen Schieberegler in der Algebra-Ansicht verändert werden. Bei Veränderung der Eintrittsstelle bleibt der voreingestellte Winkel jedoch unverändert.

Schließlich wurde die Farbe der Halbkreisscheibe (g) gegen einen Blauton getauscht. Die Scheibe ist außerdem in der 3D-Ansicht zu einem Körper vervollständig worden, wobei die Modellierung des Lichtwegs sich weiterhin in der xy-Ebene abspielt. Diese Änderung zielt auf den generellen Einsatz dynamischer Modelle im Rahmen von AR-Experimenten ab (siehe Abschnitt „Grafik“ in diesem Kapitel).

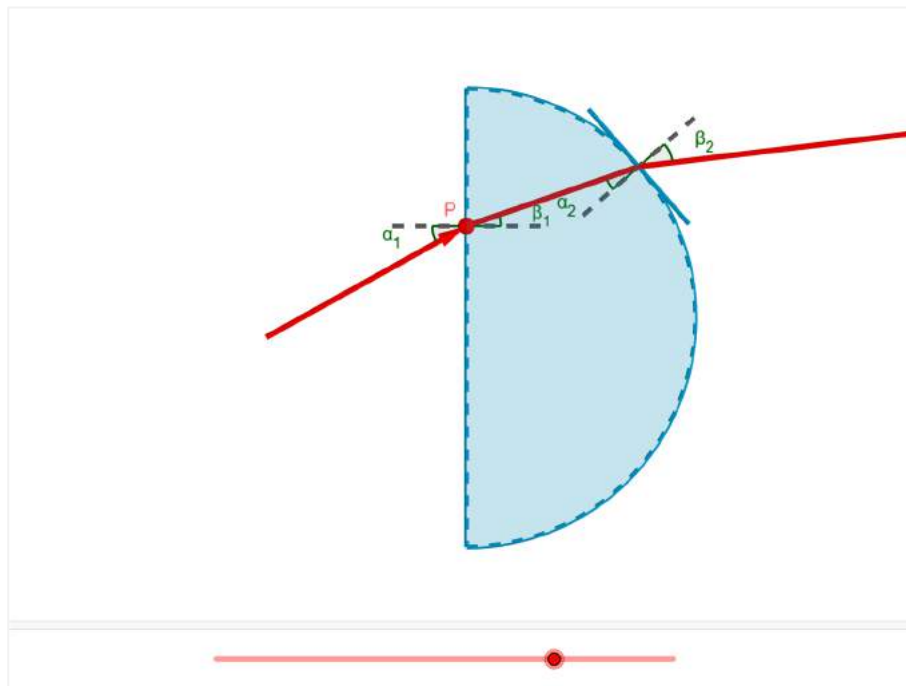


Abbildung 45: Umgestaltetes dynamisches Modell zum Lichtweg durch eine Halbkreisscheibe als GeoGebra-Aktivität

Das umgestaltete Modell ist in Abbildung 45 als GeoGebra-Aktivität zu sehen. Im unteren Teil befindet sich ein Schieberegler, der die Eintrittsstelle P , also den Parameter verändert, der die gewünschte Beobachtung hervorruft. Solche GeoGebra-Aktivitäten werden im Browser geöffnet und u. a. mit Texten zur Beschreibung der Modelle und ihrer Bedienung ergänzt (siehe Abschnitt „Erstellung von Lernaktivitäten mit GeoGebra“ in Kapitel 2.4.2). Aufgaben mit Feldern für Freitextantworten können Lernende zur Formulierung entsprechender Hypothesen auffordern und Lösungsverschlüsse als Feedback geben. Im weiteren Unterrichtsverlauf lässt sich das Modell auch mit der App *GeoGebra 3D Rechner* öffnen. Dort sind die restlichen Variablen als Schieberegler für weiterführende Aufgabenstellungen zu sehen (siehe Abbildung 46). Wird das Modell mit der App auf einem AR-fähigen Smartphone oder Tablet geöffnet, ist darüber hinaus die Anpassung des Modells an einen realen Aufbau im AR-Experiment möglich (siehe Kapitel 3.1.5).

Die Ergebnisse und daraus abgeleiteten Erkenntnisse haben zur Verfeinerung der Vorstellungen zur Gestaltung von dynamischen Modellen beigetragen. Im Folgenden werden Empfehlungen aufgezählt, die sich außerdem auch in der stetigen Entwicklungsarbeit mit *GeoGebra* und dem fortdauernden Einsatz von dynamischen Modellen in Lehre und Forschung bewährt haben (siehe Kapitel 6).

4 Dynamische Modelle im Praktikum der Optik

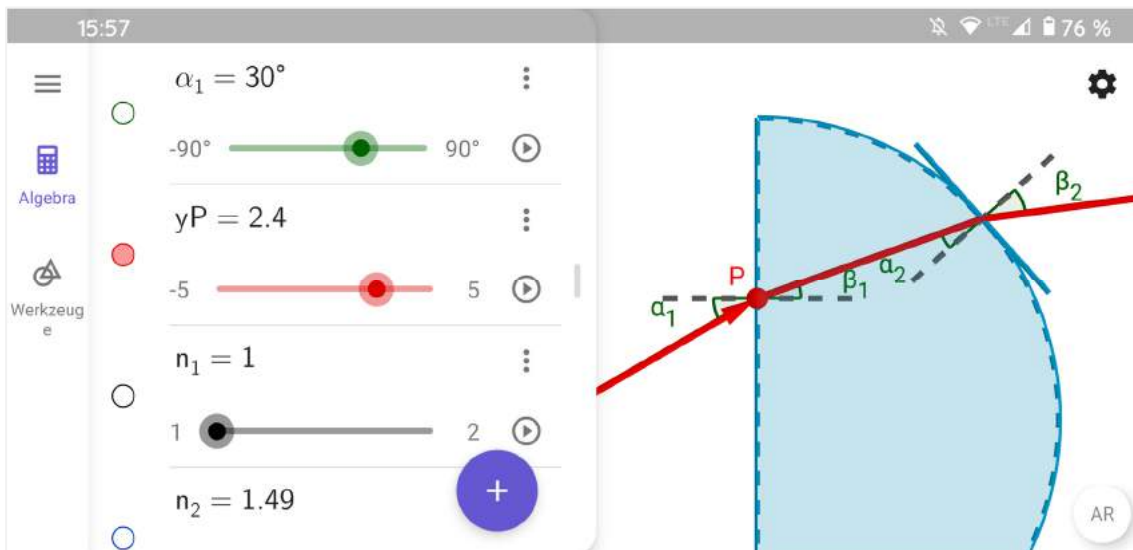


Abbildung 46: Dynamisches Modell zum Lichtweg durch eine Halbkreisscheibe im *GeoGebra 3D Rechner*

Sie gliedern sich in die drei Ebenen Grafik, Objekte und Bedienung, in denen Einfluss auf die didaktische Gestaltung des digitalen Lernmediums genommen werden kann (siehe Abbildung 47). Erkenntnis 1 in Kapitel 4.5.1 bezüglich der Faktoren der Arbeit mit einem dynamischen Modell lässt sich direkt auf die Gestaltungsebenen anwenden, um allgemeine Empfehlungen abzuleiten:

1. Grafik so wählen, dass die erforderliche *Anpassung der Oberfläche* des Modells durch die anwendende Person minimal und das Verständnis des abgebildeten Systems maximal ist.
2. Objekte so definieren, dass nur die notwendigen *Veränderungen der Eigenschaften* des Modells durch die anwendende Person vorgenommen werden können.
3. Bedienung so einrichten, dass die gewünschte *Untersuchung des Systems* durch die anwendende Person in dem Modell erleichtert wird.

Im Folgenden werden die allgemeinen Gestaltungsempfehlungen auf jeder Ebene für die Umsetzung mit *GeoGebra* konkretisiert. Sie wurden bei einer Reihe von dynamischen Modellen für die Optik angewandt, die für das im Folgenden vorgestellte Unterrichtskonzept entwickelt wurden (siehe Kapitel 5).

Grafik

Das Softwarepaket von *GeoGebra* verbindet in der *Classic* Version verschiedene Ansichten (Fenster), die bei der Gestaltung eines dynamischen Modells hinzugefügt, entfernt, unterschiedlich kombiniert und angeordnet werden können. In den

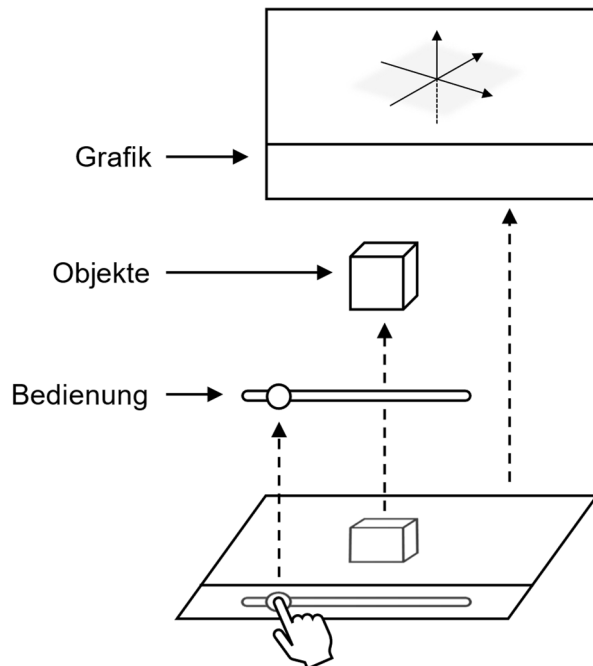


Abbildung 47: Gestaltungsebenen von dynamischen Modellen

neueren Anwendungen sind die Algebra-Ansicht (siehe Abschnitt „Objekte“ in diesem Kapitel) und – je nach App – eine einzelne 2D oder 3D Grafik-Ansicht fest in die Benutzeroberfläche eingebaut.⁵⁸ Diese Apps wirken dadurch weniger überladen, was vor allem Lernenden oder generell Personen mit wenig Erfahrung mit *GeoGebra* den Überblick erleichtert. Für die mobile Anwendung auf Smartphones oder Tablets sind die Apps außerdem aufgrund ihrer Anpassung an die Leistung und die Touch-Steuerung der Geräte zu bevorzugen.

Darüber hinaus wird im Hinblick auf einen möglichen Einsatz von dynamischen Modellen als AR-Experimente von vornherein die Arbeit mit der 3D-Ansicht der App *GeoGebra 3D Rechner* empfohlen. Selbst wenn sich die gewünschte Visualisierung des physikalischen Systems ausschließlich in einer Ebene abspielt, bietet die Betrachtung des Modells in 3D die Möglichkeit, es mit der AR-Funktion beispielsweise auf die Tischfläche einzublenden und an reale Gegebenheiten anzupassen. Vor allem ist es in der perspektivischen Darstellung einer 3D-Grafik leichter zu erkennen, wie die in der Fläche angeordneten Objekte räumlich orientiert sind. In der 2D-Ansicht ist es zumindest ohne zusätzliche Information nicht eindeutig zu erkennen, welche Szene dargestellt wird. Wie in Abbildung 48 oben dargestellt, ist es z. B. üblich, die Spiegelachse eines ebenen Spiegels als eine

⁵⁸ Die *GeoGebra Rechner Suite* verbindet zwar die verschiedenen Apps in einer Anwendung, sie arbeiten aber bislang unabhängig voneinander. Die Objekte werden somit nicht zwischen den verschiedenen Ansichten geteilt. Der *GeoGebra Grafikrechner* ist auf die 2D-Ansicht beschränkt. Der *GeoGebra 3D Rechner* bietet nur die 3D-Ansicht an.

4 Dynamische Modelle im Praktikum der Optik

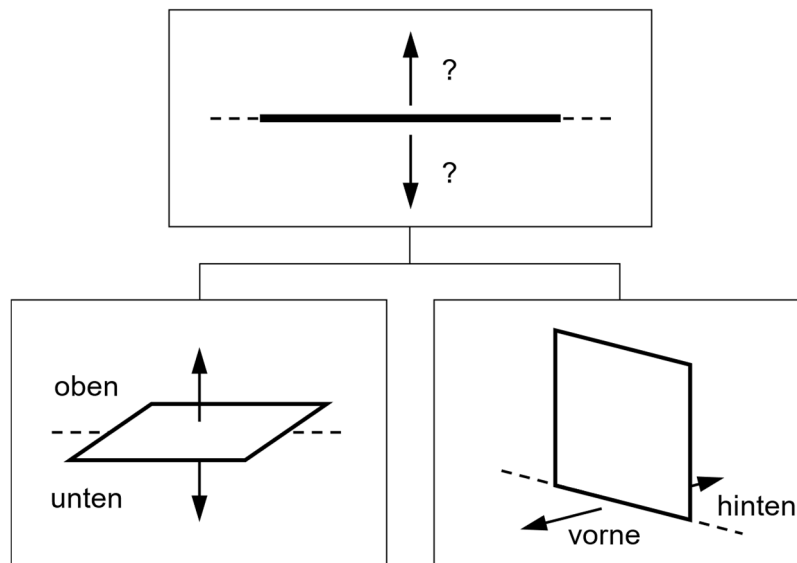


Abbildung 48: Mehrdeutigkeit von 2D-Darstellungen am Beispiel der Spiegelachse

Gerade zu zeichnen, die die Fläche in zwei Halbebenen trennt. Es gibt aber zwei naheliegende Möglichkeiten, diese Darstellung zu interpretieren. Es kann sich um den Blick von der Seite handeln, dann zeigen die abgebildeten Pfeile nach oben und unten. Es kann sich auch um den Blick von oben handeln, dann zeigen die Pfeile nach vorne und hinten.

Beim Modellieren im *GeoGebra 3D Rechner* wird diese Mehrdeutigkeit umgangen, indem die Vorgänge, die sich in der Fläche abspielen und normalerweise von oben betrachtet werden, in der xy -Ebene konstruiert werden. Vorgänge, die von der Seite betrachtet werden, können sich an der xz - oder yz -Ebene orientieren. Manche Objekte sollten sich in diesem Fall zusätzlich in die dritte Dimension austrecken. Es kann sich um den restlichen Teil eines Körpers oder auch um eine Hilfslinie handeln, sodass das 3D-Bild komplett ist und das Modell in der perspektivischen Darstellung auf dem Bildschirm in Bezug auf die modellierte Situation richtig interpretiert werden kann.⁵⁹ Das standardmäßig in der Grafik-Ansicht sichtbare Koordinatensystem und die xy -Ebene können danach im fertigen Modell ausgeblendet werden.

⁵⁹ Die verschiedenen Möglichkeiten, die bessere Interpretierbarkeit der 3D Grafik-Ansicht beim Modellieren auszunutzen, werden in den drei Modellen zum Thema Spiegel in Kapitel 5.1.3 verdeutlicht.

Objekte

Die Algebra-Ansicht von *GeoGebra* enthält alle im Modell vorhandenen Zahlen und Objekte wie Winkel, Punkte, Geraden oder Strecken. Die Liste wird standardmäßig nach der Konstruktionsreihenfolge sortiert. Bei der Erstellung dynamischer Modelle wird die Sortierung nach Objekttyp empfohlen, um ganze Objekttypen auf einmal markieren und bearbeiten zu können. Dynamische Modelle, die einen bestimmten physikalischen Zusammenhang visualisieren, enthalten jedoch nicht nur die Objekte, die in der Grafik-Ansicht angezeigt werden, sondern auch die mathematischen Objekte, die für ihre geometrische Konstruktion benötigt wurden und danach ausgeblendet werden.⁶⁰ Bei umfangreichen Modellen führt das schnell zu einer langen und unübersichtlichen Liste an Objekten, die in ihren jeweiligen Einstellungen als Hilfsobjekte markiert werden können. Sie werden infolgedessen in der Algebra ausgeblendet. Die Möglichkeit, ganze Objekttypen auszuwählen, erleichtert diesen Prozess. Alle Hilfsobjekte können über ein Kontrollkästchen in den Einstellungen wieder in der Algebra sichtbar gemacht werden, um weiterhin Änderungen vornehmen zu können. Die einzigen Einträge, die in der Algebra weiterhin sichtbar bleiben, sind die Zahlen, die als Schieberegler die Eigenschaften der Objekte wie Größe und Position bestimmen.

Eine wesentliche Gestaltungsempfehlung bezieht sich auf die Frage bezüglich dessen, mit welcher Art von Objekten physikalische Zusammenhänge repräsentiert werden und was keiner Visualisierung bedarf. Um diese Frage zu beantworten, wird die Rolle von Modellen in der naturwissenschaftlichen Erkenntnisgewinnung herangezogen. Modelle basieren auf Theorien und den darin verankerten wissenschaftlichen Prinzipien, die Aussagen über abstrakte Konstrukte wie Kraft oder Lichtstrahl bzw. Lichtweg enthalten, die nicht direkt beobachtbar sind (siehe Kapitel 2.2). Stattdessen können nur die Phänomene wahrgenommen werden, deren Zustandekommen mit den in Modellen verankerten Fachbegriffen erklärt wird. Beschleunigung als Folge einer resultierenden Kraft oder ein heller Lichtfleck als Folge von dort ankommenden Lichtwegen. Daraus wird der didaktische Zweck eines dynamischen Modells abgeleitet. Es visualisiert in erster Linie die mentalen Konstrukte und nicht das reale Phänomen, das in einem Experiment

⁶⁰ In der Optik ist es z. B. üblich, einen Strahl zu konstruieren, der von einem Gegenstandspunkt ausgeht. Trifft dieser auf ein Hindernis, einen Spiegel oder eine Linse, dann wird zunächst der Schnittpunkt und im nächsten Schritt eine Strecke zwischen Gegenstandspunkt und Schnittpunkt konstruiert. Diese Objekte hänge zwar vom Strahl ab, aber der Strahl selbst wird im fertigen Modell entweder komplett ausgeblendet oder unter der Bedingung angezeigt, dass der Schnittpunkt nicht existiert, wenn eine andere Richtung eingestellt wurde.

4 Dynamische Modelle im Praktikum der Optik

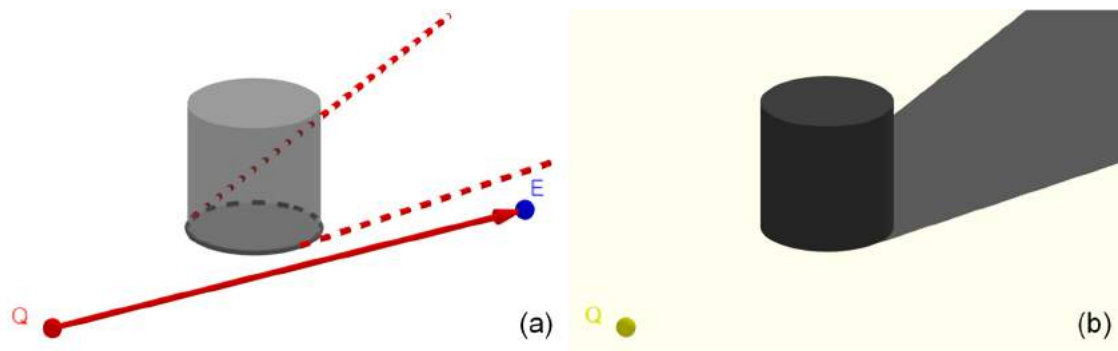


Abbildung 49: Dynamisches Modell zum Schatten mit (a) umgesetzten und (b) gegenteiligen Gestaltungsempfehlungen

beobachtet werden kann. Es wird absichtlich abstrakt gehalten, damit die von vornherein abstrakten Objekte nicht mit den realen Beobachtungen vermischt werden. So werden beispielsweise Lichtwege, die von einer Lichtquelle ausgehen, die warmweißes Licht abstrahlt, absichtlich nicht weiß oder gelb gezeichnet, sondern rot. Es soll nicht der Eindruck entstehen, dass es sich um einzelne begrenzte Lichtbündel handelt, sondern konstruierte Strecken, die den Weg und die Ausbreitungsrichtung des an sich unsichtbaren Lichts darstellen. Genauso werden Lichtflecke oder Schattenbereiche nicht als gelbe Kreise oder graue Flächen abgebildet. Dargestellt wird das, was zu ihrer Entstehung beiträgt: Punkte, an denen Lichtwege ankommen, oder Randstrahlen, die basierend auf der geradlinigen Lichtausbreitung in der Realität helle und dunkle Bereiche abgrenzen.

In Abbildung 49 ist auf der linken Seite ein dynamisches Modell zum Schatten eines Zylinders dargestellt, welches diesen Regeln folgt: Beim Verschieben von Punkt E hinter den Zylinder, wird der rote Pfeil, der einen Lichtweg darstellen soll, von dem Hindernis unterbrochen. An diese Stellen, die durch die Randstrahlen eingegrenzt werden, gelangt kein Licht. Das Modell sagt somit Schatten voraus. Das Modell auf der rechten Seite ist das genaue Gegenteil. Es simuliert lediglich eine idealisierte Version des Phänomens Schatten in einem virtuellen Raum und zeigt nicht, wie es zustande kommt. Solche Darstellungen können auch einen didaktischen Nutzen haben, wenn das Phänomen überhaupt nicht oder nur erschwert im Unterricht zu beobachten ist. Zumindest in der Optik sind reale Experimente und Beobachtungen zu den meisten behandelten Phänomene möglich.

Bedienung

Die Bedienungsmöglichkeiten eines dynamischen Modells in *GeoGebra* hängen davon ab, welche Bestandteile und Größen zu Beginn als freie Objekte definiert

werden. Diese Entscheidung muss wohlüberlegt sein, denn die restliche Konstruktion wird mit von ihnen abhängigen Objekten vervollständigt. Die Variation der freien Objekte beeinflusst das dynamische Verhalten des gesamten Systems. Daneben ist zu beachten, wie die Objekte definiert werden. Der einfachste Weg beispielsweise einen Punkt in der Grafik-Ansicht erscheinen zu lassen, ist das Klicken oder Tippen auf die Zeichenebene mit dem vorher ausgewählten Werkzeug *Punkt*. Das erzeugt ein freies Objekt, welches infolgedessen mit der Maus oder mit dem Finger an jede beliebige Stelle verschoben werden kann. Wie bereits während der Umgestaltung des dynamischen Modells zum Lichtweg durch eine Halbkreisscheibe argumentiert wurde, ist die Interaktion mit solchen Objekten auf Geräten mit Touch-Steuerung erschwert. Es hat sich in der Studie zudem gezeigt, dass manche Personen die Bedienung freier Punkte im Vergleich zu Schieberegler eher vernachlässigen, selbst wenn in der Modellbeschreibung ausgewiesen wird, dass sie zu verschieben sind (siehe Cluster 4 in Kapitel 4.4.4). Das kann mit der Anzahl der Freiheitsgrade erklärt werden. Ein Schieberegler ist auf eine Dimension beschränkt und die mögliche Variation ist durch ein vorgegebenes Minimum und Maximum eingegrenzt. Ein Punkt in der xy-Ebene kann auf der gesamten Fläche in alle Richtungen verschoben werden. Diese Offenheit erschwert den Studienergebnissen zufolge die Arbeit mit dem Modell (siehe Erkenntnis 8 in Kapitel 4.5.1).

Um einen Punkt über Schieberegler bedienen zu können, müssen seine Koordinaten zunächst als Zahlen (Variablen) definiert werden. Für einen Punkt, der in der 3D Grafik-Ansicht beispielsweise nur in der xy-Ebene verschoben werden darf, müssen in die Eingabezeile nacheinander folgende Befehle eingegeben werden:

$$a=1 \leftarrow^{61}$$

$$b=2 \leftarrow$$

$$(a, b, 0) \leftarrow$$

Damit werden zwei Schieberegler a und b mit den standardmäßigen Bereichen von -5 bis 5 und ein Punkt A , der zunächst die Koordinaten $(1,2,0)$ hat, definiert. Dieser kann jetzt innerhalb des vorgegebenen Bereiches sowohl mit der Maus als auch mithilfe der Schieberegler bewegt werden. In den Einstellungen der Schieberegler können das Minimum und Maximum sowie eine feste Schrittweite vorgegeben werden, was es im Vergleich zu einem freien Punkt in der xy-Ebene

⁶¹ Jeder Eintrag wird mit der Eingabetaste (\leftarrow) bestätigt, damit der Befehl ausgeführt wird.

4 Dynamische Modelle im Praktikum der Optik

ermöglicht, den Handlungsspielraum und die Anzahl der zu betrachtenden Positionen festzulegen.

Eine weitere Erkenntnis nach dem Einsatz von dynamischen Modellen im physikalischen Praktikum war, sie so zu gestalten, dass auf die Untersuchung des Systems ausgerichtete Handlungen begünstigt werden (siehe Erkenntnis 1 in Kapitel 4.5.1). Bei der Konstruktion sollten zunächst so viele Parameter wie möglich als Schieberegler definiert werden. Jedoch sind nicht alle Variationsmöglichkeiten für das Erreichen eines bestimmten Lernziels relevant. Wie bereits in dem vorherigen Abschnitt erwähnt, lassen sich einzelne Objekte als Hilfsobjekte markieren, um sie während der Arbeit mit dem Modell in der Algebra auszublenden. Dasselbe lässt sich auch mit für den beabsichtigten Einsatz nicht benötigten Schieberegler anstellen. Um einen bestimmten Zusammenhang mithilfe eines dynamischen Modells zu zeigen, reicht in der Regel bereits ein Schieberegler aus. Darauf aufbauende Aussagen, lassen sich mit einem leicht modifizierten Modell in einem nächsten Schritt erarbeiten. Mehr Schieberegler und genauere Angaben in der Algebra sind jedoch dann notwendig, wenn das dynamische Modell an die Gegebenheiten eines Experiments angepasst wird. Das ermöglicht sowohl den Abgleich theoretischer Berechnungen im Modell mit den gemessenen Werten im Experiment als auch die Anpassung des Modells an den realen Aufbau im Rahmen eines AR-Experiments. Für beide Fälle wird die Arbeit mit SI-Einheiten bei der Definition der Zahlenwerte für die Schieberegler empfohlen.

5 Optik mit Modellen und Experimenten

In Kapitel 3 wurde das naturwissenschaftsdidaktische Konzept der physikalischen Modellbildung aus erkenntnistheoretischen Überlegungen in Kapitel 2 zu Modellen und ihrer Rolle im Physikunterricht abgeleitet. Es zielt auf ein Lernen mit Modellen und Experimenten in einem gemeinsamen Problemlöseprozess ab. In Kapitel 4 wurde eine Studie vorgestellt, in der untersucht wurde, wie Studierende mit dynamischen Modellen in einer offenen Lernumgebung arbeiten, darauf aufbauend Hypothesen formulieren und Experimente durchführen. Die Studienergebnisse führten zu Gestaltungsempfehlungen für dynamische Modelle, die als Lernmedien im Kreislauf der Erkenntnisgewinnung die Funktionen Visualisierung und Simulation erfüllen (siehe Kapitel 3.1.3). Sie werden dadurch stärker auf ein bestimmtes Lernziel ausgerichtet, das Lernende eigenständig entdecken können (siehe Kapitel 4.5.3).

Die physikalische Modellbildung ist nicht auf ein bestimmtes Themengebiet beschränkt. Allerdings ist die Optik eines der ersten Themengebiete der Physik, deren Inhalte auch für niedrige Klassenstufen erklärt, also „auf einer höheren Modellebene beschrieben“ werden können als auf der rein phänomenologischen (Erb & Teichrew, 2020, S. 24). Es werden erste naturwissenschaftliche Prinzipien wie z. B. die geradlinige Lichtausbreitung oder das Fermatsche Prinzip kennengelernt. Sie können bei der Konstruktion der Modelle herangezogen werden, um bekannte oder im Unterricht demonstrierte Phänomene physikalisch zu deuten. Zudem können die aus den Modellen abgeleiteten Hypothesen mit einfachen Experimenten im Unterricht überprüft werden.

Beim Vergleich des Optikunterrichts der Sekundarstufe I, wie er in Schulbüchern oder Lehrplänen dargestellt ist (z. B. HKM, 2016, S. 6), mit didaktischen Unterrichtskonzeptionen, die sich an Phänomenen oder Vorstellungen der Lernenden orientieren, lässt sich eine Abkehr von dem theoretisch fachsystematischen Vorgehen hin zu einem praktisch beschreibenden beobachten.⁶² Es wird kein großer Wert auf das Strahlenmodell des Lichts und der damit verbundenen geometrischen Konstruktionen oder abgeleiteten Gesetzen (Abbildungs-, Reflexions- und

⁶² Namentlich genannt sei an dieser Stelle die phänomenologische Optik von Schön et al. (2003) oder das Sender-Strahlungs-Empfänger-Konzept von Wiesner, Engelhardt und Herdt (1993). Eine umfangreiche Darstellung der Unterrichtskonzeptionen zur Optik ist zu finden bei Haagen-Schützenhöfer und Wilhelm (2021).

5 Optik mit Modellen und Experimenten

Brechungsgesetz) gelegt, sondern auf das Erleben und Beschreiben der Eigenschaften des Lichts und der mit optischen Hilfsmitteln erzeugten Bilder (Lochkamera, Spiegelbild, optische Hebung). Während auf der einen Seite geometrische Modelle den Schwerpunkt der unterrichtlichen Auseinandersetzung mit dem Thema bilden, sind es auf der anderen Seite optische Phänomene und ihre physikalisch angemessene Beschreibung. Eine solche Umgestaltung des Unterrichts hat zur Folge, dass Interventionsgruppen insbesondere bei Testfragen, die beispielsweise mit dem Sender-Strahlungs-Empfänger-Konzept gelöst werden können, bessere Ergebnisse erreichen als die Kontrollgruppen (Haagen-Schützenhöfer, 2017, S. 112). Ausschließlich theoretische Kenntnisse und damit im Zusammenhang stehende fachbezogene Fertigkeiten (z. B. Konstruieren und Rechnen) garantieren den Lernenden zwar keine angemessenen Vorstellungen über Phänomene. Allerdings müssen sie nicht nur lernen, wie reale Phänomene fachlich erläutert, sondern auch wie abstrakte Modelle konstruiert, überprüft und wissenschaftlich zur Deutung der Phänomene genutzt werden.

Schön et al. (2003) warnen in ihren Unterrichtsvorschlägen vor der frühzeitigen Einführung des Lichtstrahlmodells, das „ein Gedankenkonstrukt, ein Modell und ein Hilfsmittel“ ist (S. 4). Sie weisen auf die Gefahr einer Verwechslung des Modells mit der Realität im Hinblick auf Interferenzphänomene hin, deren Deutung erschwert wird, wenn Lernende denken, das Licht bestehe tatsächlich aus Strahlen (S. 36). Grebe-Ellis (2006) fordert eine *Optik der Bilder*, bei der es darum geht, „konkrete Erscheinungszusammenhänge“ aufzustellen und „die objektiven und subjektiven Bedingungen ins Auge zu fassen, die mit ihrem aktuellen Gegebenen auf durchschaubare Weise verknüpft sind“ (S. 164). Er weist zwar ebenfalls auf die „Grenze zwischen tatsächlich observablen und prinzipiell hypothetischen Größen“ hin, die durch eine unreflektierte Anwendung physikalischer Begriffe nicht verschleiert werden darf (siehe These 1 in Kapitel 3.1.1). Die Kritik an der (reduktionistischen) physikalischen Sichtweise geht jedoch noch weiter: Die Konzentration „auf unbeobachtbare Größen und Vorgänge“, die ein Erklären erst möglich machen, führe zur Ansicht, dass es eine „nicht erreichbare objektive Wirklichkeit“ gäbe, die der „subjektiven Wahrnehmung“ entgegengestellt werde (S. 144). Die Konsequenz ist ein Vorgehen, das sich auf die Wahrnehmung fokussiert und anstelle von Lichtstrahlen die Begriffe *Lichtweg*, *Prinzip Ameise* und *Spiegelwelt* einführt.⁶³ Obwohl hierbei nicht von einem Modell gesprochen wird,

⁶³ Eine Darstellung eines solchen Unterrichtskonzepts lässt sich auf der Webseite der AG Didaktik der Physik der HU Berlin finden (Schön & Guderian, n. d.).

wird den Lernenden dennoch eine Heuristik nahegelegt, reale Beobachtungen zu erkennen, zu beschreiben und auch zu deuten. Neben den Eindrücken experimenteller Demonstrationen bleiben als Ergebnis Äußerungen in Unterrichtsgesprächen, Merksätze und Skizzen auf Arbeitsblättern übrig, die genauso als Ausdrucksformen mentaler Modelle der Lehrenden und Lernenden, also als Modellobjekte betrachtet werden können (siehe Kapitel 2.1). Muckenfuß (2001) spricht anhand eines Beispiels Wagenscheins zur Lichtinterferenz von der Sprache als „das trojanische Pferd, mit dessen Hilfe der Zusammenhang zwischen Licht und einem Schwingungsvorgang ins Denken geschmuggelt wird“ (S. 1). Nicht die Modellhaftigkeit der Unterrichtsinhalte stellt eine Gefahr für adäquate Vorstellungen dar, sondern der intransparente Umgang oder gar eine Vermischung des Realen und Mentalen – der reinen Wahrnehmung und der auf Gedankenkonstrukten basierten Interpretation der Wirklichkeit – unabhängig davon, welche Bezeichnungen und Gedankenkonstrukte herangezogen werden (siehe These 4 in Kapitel 3.1.3). Im Unterricht gilt es deshalb, sowohl die Subjektivität physikalischer Erkenntnisse als auch den hypothetischen Charakter abstrakter naturwissenschaftlicher Prinzipien hervorzuheben (hypothetischer Realismus; Leisner-Boedenthin, 2006).

Bei der Zusammenstellung des im Folgenden vorgestellten Unterrichtskonzepts wurde ein hoher Wert auf die Bezeichnung und Reihenfolge der Lernschritte gelegt (siehe Abbildung 50). Sie orientiert sich an den vier Lernprodukten physikalischer Modellbildung (Phänomen, Modell, Hypothese und Experiment, siehe Kapitel 3.1.1) und wird zur Sicherung und Reflexion der Erkenntnisse mit den Punkten 5 und 6 (Ergebnisse und Diskussion) ergänzt. Die wiederkehrende Struktur soll Lernenden den Erkenntnisprozess transparent machen.⁶⁴

Bei der Gestaltung von Lernmedien im Rahmen der physikalischen Modellbildung ist darauf zu achten, dass Phänomene und Experimente direkt beobachtet oder mit realen Aufnahmen illustriert werden, während die Objekte in den dynamischen Modellen als geometrische, computergenerierte Darstellungen zu erkennen sind (siehe Abschnitt „Objekte“ in Kapitel 4.5.3). Punkte und Pfeile, die Orte primärer Lichtquellen und Lichtwege darstellen sollen, werden in Rot gehalten, während Empfängerpunkte blau gefärbt sind. Punkte auf Flächen, die von Lichtwegen erreicht werden, werden als sekundäre Lichtquellen orange gefärbt,

⁶⁴ Sie entstand in Anlehnung an den „Lösungsplan für Modellierungsaufgaben“ für Lernende mit vier Schritten (Blum, 2010, S. 48), der vom Modellierungsprozess nach Blum und Leiß abgeleitet wurde (siehe Kapitel 2.3.2).

5 Optik mit Modellen und Experimenten

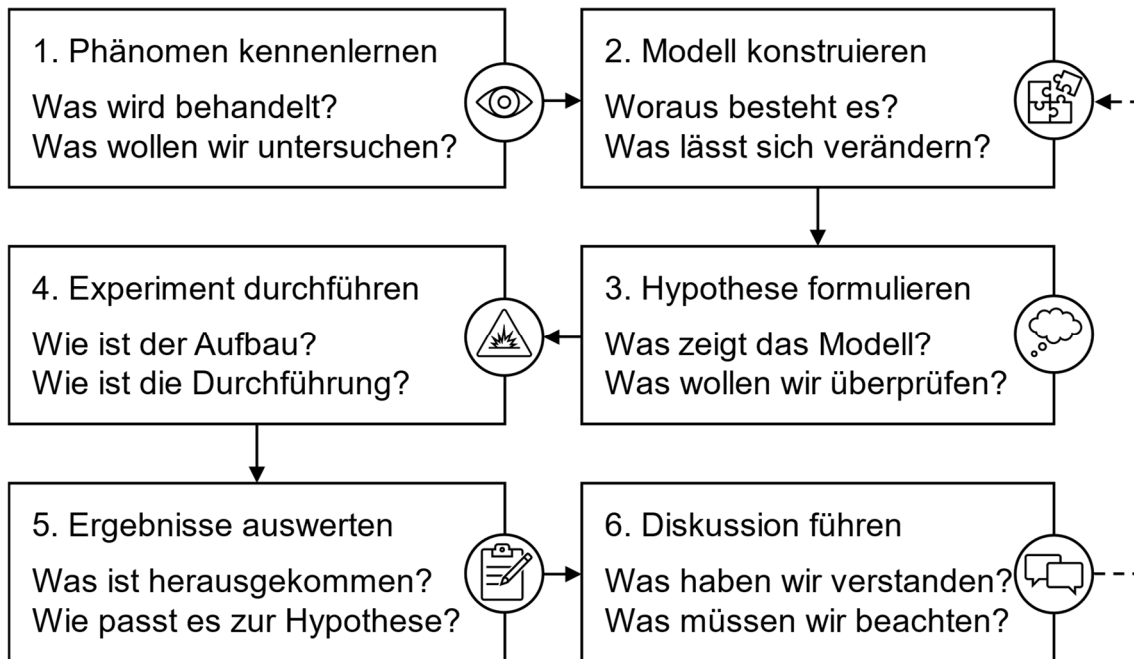


Abbildung 50: Vereinfachter Erkenntnisprozess beim Lernen mit Modellen und Experimenten für Lernende

genauso wie später Gegenstandspunkte oder Gegenstandspfeile auf der optischen Achse. Die optischen Abbildungen der Gegenstände werden in Hellblau dargestellt, wobei virtuelle Bilder durch gestrichelte Verlängerungen der Lichtwege entstehen und auch selbst im Gegensatz zu reellen Bildern als gestrichelte Pfeile gezeichnet werden. Die Beschreibungen der Modelle oder auf ihnen basierende Aussagen verknüpfen die abstrakten Begriffe wie Punkt oder Pfeil mit dem, *für was* die Modellobjekte stehen, also Lichtquellen und Lichtwege. Neue Fachbegriffe werden in den Konstruktionen zunächst ausgeschrieben und so mit den modellierten Objekten in Verbindung gebracht. Im weiteren Verlauf werden wiederkehrende Objekte mit Buchstaben abgekürzt, um die Modelle übersichtlich zu halten (z. B. *Q* statt *Lichtquelle* und *G* statt *Gegenstandspunkt*). Außerdem sind die vorgestellten dynamischen Modelle in der 3D Grafik-Ansicht konstruiert worden (siehe Abschnitt „Grafik“ in Kapitel 4.5.3). Optische Achsen oder die für die perspektivische Darstellung benötigten Hilfslinien werden grau gestrichelt gezeichnet.

Was die Sachstruktur angeht, gibt Tabelle 31 einen Überblick über die wesentlichen Themen und Eigenschaften des Unterrichtskonzepts. Es besteht aus einem Teil, der mehr an den Vorstellungen der Lernenden und einzelnen Phänomenen orientiert ist (Anfangsoptik, siehe Kapitel 5.1), gefolgt von einem Teil, der die

fachliche Systematik aufgreift (geometrische Optik, siehe Kapitel 5.2). Das übergeordnete Ziel ist, den Prozess der Erkenntnisgewinnung systematisch und über alle Themen hinweg erfahrbar zu machen. Die vorgeschlagenen Modelle bauen

Tabelle 31: Sachstruktur des Unterrichtskonzepts

| | | |
|----------------------------|--|---|
| Ziel | Erkenntnisgewinnung durch Modellierung optischer Phänomene und Überprüfung der Modelle in Experimenten | |
| Gliederung | Anfangsoptik | Licht, Schatten, Spiegel |
| | Geometrische Optik | Lochkamera, Fermatsches Prinzip, Brechung und Totalreflexion, Abbildungen an Linsen |
| Erkenntnisprozess | Durch eigene Wahrnehmung gestützte Modelle zur Betrachtung der Lichtwege zwischen Lichtquelle und Empfänger | |
| Modellierung | Konstruktion geradliniger Lichtwege zwischen Lichtquelle und Empfänger | |
| Lichtausbreitung | Gleichmäßige Verteilung geradliniger Lichtwege in alle Richtungen ausgehend von der Lichtquelle | |
| Sehvorgang | Verknüpfung der Sichtbarkeit von Objekten mit der Streuung des Lichts an Flächen in verschiedene Richtungen | |
| Schatten | Verknüpfung der Helligkeitsunterschiede mit der Anzahl von Lichtwegen aus verschiedenen Lichtquellen | |
| Abbildungen an Lochblenden | Verknüpfung des aus mehreren Bildflecken zusammengesetzten Bildes mit Leuchtpunkten der Lichtquelle | |
| Spiegel | Verknüpfung der Entstehung eines Spiegelbildes mit dem Reflexionsgesetz | |
| Brechung | Verknüpfung der optischen Hebung mit dem Brechungsgesetz | |
| Abbildungen an Linsen | Verknüpfung der Abbildung an dünnen Linsen mit der Brechung beim Ein- und Austritt und anschließender Formulierung von Regeln für ausgezeichnete Lichtwege | |
| Abbildungsgesetz | Ableitung aus einem Modell zur Bildentstehung an einer Lochkamera | |
| Reflexionsgesetz | Explorative Entdeckung mit nachträglicher Erklärung durch das Fermatsche Prinzip | |
| Brechungsgesetz | Formulierung eines elementarisierten Brechungsgesetzes anhand des Lichtwegs mit der kürzesten optischen Weglänge | |
| Linsengleichung | Ableitung aus einem Modell zur Brechung an der Mittelebene | |

5 Optik mit Modellen und Experimenten

zwar inhaltlich aufeinander auf, aber sie sind von der gemeinsamen Idee geprägt, die Ausbreitung des Lichts im Raum und damit zusammenhängende Phänomene mithilfe konstruierter Lichtwege zu verstehen. Zum Erkenntnisprozess gehört nicht nur das Erkennen und Benennen der Phänomene, sondern auch die Überprüfung der Modelle in Experimenten. Die vorgeschlagenen Experimente orientieren sich an den Modellen, sodass Vergleiche zwischen den modellbezogenen Aussagen und den experimentellen Beobachtungen möglich sind. Die Durchführung der beschriebenen Experimente kann in den meisten Fällen sowohl mit als auch ohne den Einsatz von AR erfolgen. In AR lassen sich jedoch die modellhaften Darstellungen und die Aussagen, die durch sie transportiert werden, in einen direkten Bezug zum beobachtbaren Phänomen stellen (siehe Kapitel 3.1.5).

Als Ergebnis wird in jedem elementaren Thema der Optik der Sekundarstufe I das Fachliche mit dem Beobachtbaren verknüpft (siehe Sehvorgang bis Linsengleichung in Tabelle 31). Die Helligkeit des Schattens wird beispielsweise mit der Anzahl möglicher Lichtwege erklärt, mit denen die Lichtausbreitung zuvor visualisiert wurde. Im Übrigen werden einige Begriffe im Rahmen eines Themas eingeführt, um sie an anderer Stelle im Sinne eines Spiralcurriculums zu vertiefen. Der Spiegel taucht beispielsweise beim Thema Streuung als eine andere Form der Reflexion auf. Im zweiten Teil des Unterrichtskonzepts werden Abbildungen mit einer Lochkamera als eine Variante von Schattenbildern eingeführt. Die geradlinige Lichtausbreitung und das Reflexionsgesetz werden ebenfalls wieder aufgegriffen, um das Fermatsche Prinzip zunächst in vereinfachter Form zu behandeln. Danach wird es unter Einbezug der unterschiedlichen Brechungsindizes modifiziert, sodass Brechung und Brechungsgesetz darauf zurückgeführt werden können.

5.1 Anfangsoptik

Der Begriff *Anfangsoptik* umfasst in diesem Unterrichtskonzept die ersten Erfahrungen, die Lernende mit dem Themengebiet der Optik machen. Die behandelten Themen orientieren sich an bekannten alternativen Vorstellungen, die zu Beginn der folgenden Unterkapitel erläutert werden. Danach werden die mithilfe von dynamischen Modellen eingeführten physikalischen Konzepte vorgestellt. Zunächst werden gezielt die Vorstellungen zum Licht und Sehen thematisiert (siehe Kapitel 5.1.1). Danach geht es um die Phänomene, die dadurch entstehen, dass an bestimmten Stellen Licht ankommt und an anderen nicht (siehe Kapitel 5.1.2).

Schließlich wird der ebene Spiegel als erstes optisches Bauteil und die damit verbundenen Phänomene behandelt (siehe Kapitel 5.1.3).

Jedes beschriebene Modell wird im Folgenden mit einer Abbildung illustriert. Allerdings werden die dynamischen Eigenschaften der Modelle erst deutlich, wenn die Aktivität mit einem entsprechenden Endgerät im Browser durchgeführt wird. Die für diesen Teil erstellten dynamischen Modelle wurden zu einem GeoGebra-Buch zusammengefasst (Teichrew, 2022b).⁶⁵

5.1.1 Licht

Wiesner (1995) fasst die physikalische Auffassung vom Licht und Sehen, die im Einführungsunterricht der Optik vermittelt werden sollte, wie folgt zusammen:

Licht wird von Körpern abgestrahlt, die entweder sehr heiß sind (glühende Wendel einer Glühlampe, Flamme o.a.), oder durch auftreffendes Licht selbst dazu angeregt werden, Licht abzustrahlen (man sagt, das einfallende Licht wird von dem Körper gestreut). Fällt ein Teil des gestreuten Lichtes ins Auge, wird auf der Netzhaut der Wahrnehmungseindruck ausgelöst: wir „sehen“ den beleuchteten Körper. [...] Der abstrahlende Körper ist der Sender und das Auge der Empfänger der Strahlung (des Lichtes). (S. 130)

In dem Absatz werden gleich mehrere Themen und physikalische Konzepte angesprochen, die im Themenbereich Licht behandelt werden. Zu diesen physikalischen Konzepten existieren verbreitete alternative Vorstellungen, die in vielen Fällen nach dem Optikunterricht bestehen bleiben (Haagen-Schützenhöfer & Hopf, 2018, S. 90). Licht hat eine endliche Geschwindigkeit und breitet sich in Luft ungehindert aus. Es sucht sich keine Richtung aus, sondern strahlt geradlinig in alle Richtungen gleich stark, und das unabhängig von den übrigen Lichtverhältnissen. Um einen bestimmten Gegenstand zu sehen, muss er Licht abstrahlen oder beleuchtet sein, aber zusätzlich muss das Licht auch in unsere Augen gelangen können. Weder Menschen noch Tiere können etwas sehen, wenn

⁶⁵ Das GeoGebra-Buch kann mithilfe des folgenden QR-Codes aufgerufen werden:



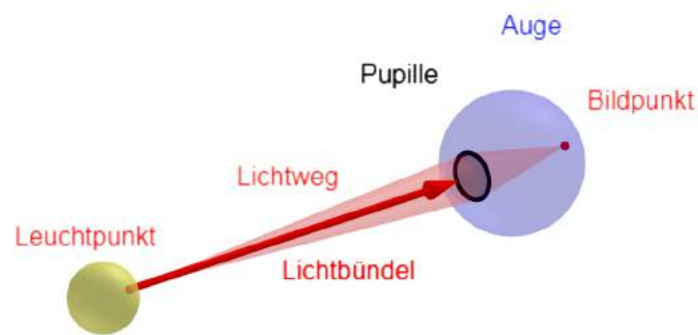


Abbildung 51: Dynamisches Modell zum Lichtweg

kein Licht in die Augen gelangt. Alles, was wir sehen können, strahlt mehr oder weniger Licht ab und erscheint deshalb heller oder dunkler. Licht bleibt auf seinem Weg jedoch unsichtbar, solange es nicht auf Materie trifft. Das Licht liegt auf beleuchteten Objekten nicht wie ein Stoff, sondern wird mehr oder weniger stark reflektiert. Hinzu kommt die Unterscheidung, ob das Licht aufgrund der Oberflächenbeschaffenheit in alle Richtungen oder in eine bestimmte Richtung reflektiert wird. Für die ungerichtete Reflexion wird für gewöhnlich der Begriff Streuung verwendet, während bei Reflexion in der Regel die gerichtete Reflexion von Licht an spiegelnden Oberflächen gemeint ist.

Der Themenbereich wird im Folgenden in die vier Themen Lichtweg, Lichtausbreitung, Streuung und Sehvorgang gegliedert. Der Erkenntnisprozess, den die Lernenden zu jedem Thema durchlaufen, wird jeweils in einem Kasten skizziert. Während die Textbausteine unter Phänomen, Modell, Experiment und Diskussion als *Input* für die Lernenden gedacht sind. Stellen Hypothese und Ergebnisse den erwarteten *Output*, also den Erwartungshorizont für mögliche Antworten dar.

Lichtweg

Um die physikalischen Konzepte der Optik zu vermitteln, sind geeignete Visualisierungen notwendig, die zur Ausbildung adäquater mentaler Modelle führen. In Anlehnung an Schön et al. (2003) wird auf den Begriff Lichtstrahl und auf schmale Lichtbündel beim Experimentieren zunächst verzichtet. Zu Beginn werden Leuchtpunkte auf ausgedehnten Lichtquellen betrachtet. Von diesen Punkten geht Licht aus, wobei unterstrichen wird, dass die Lichtausbreitung in der Luft normalerweise unsichtbar ist. Mit dem ersten Modell werden Lichtwege eingeführt, die ausgehend von einer Lichtquelle als Pfeile gezeichnet werden (siehe Abbildung 51). Die detailreiche Darstellung des Lichtbündels, das in ein Auge

gelangt, wird mithilfe eines Schiebereglers auf zwei Punkte (Lichtquelle und Empfänger) mit einem Pfeil dazwischen (Lichtweg) reduziert, was für die meisten im Folgenden behandelten Phänomene ausreichend ist. Das zugehörige Experiment unterstreicht, dass das Auftreffen von Licht auf der Netzhaut bzw. ein Lichtweg von der Lichtquelle zum Auge als Empfänger von Licht eine notwendige Voraussetzung für das Sehen einer Lichtquelle ist.

| | |
|------------|--|
| Phänomen | Wenn das Licht einer Lichtquelle in das Auge gelangt, kann man die Lichtquelle sehen. Das Licht bleibt auf seinem Weg jedoch unsichtbar. Wie kann man sich den Lichtweg vorstellen? |
| Modell | Eine Lichtquelle besteht aus vielen leuchtenden Punkten. Das Licht eines Leuchtpunktes gelangt als Lichtbündel durch die Pupille in das Auge. Im Auge wird das Licht wieder in einem Punkt auf der Netzhaut fokussiert (vereinigt). Im Kopf wird aus vielen Bildpunkten das Bild der Lichtquelle zusammengesetzt. Mit einem Schieberegler wird der Abstand zwischen Leuchtpunkt und Auge vergrößert. |
| Hypothese | Sind Leuchtpunkt und Auge weit voneinander entfernt, dann reicht es, einen Pfeil als Lichtweg zu zeichnen. Er verläuft geradlinig von der Lichtquelle zum Empfänger. |
| Experiment | Der Raum wird weitestgehend abgedunkelt. Die Augen werden zusätzlich mit den Händen verdeckt. |
| Ergebnisse | Das Auge ist ein Empfänger für Licht. In einem vollständig abgedunkelten Raum ohne Licht kann man nichts sehen. |
| Diskussion | Das Ersetzen des Lichtbündels durch einen Pfeil bezeichnet man als Idealisieren. Es kann Phänomene geben, bei denen diese und andere Idealisierungen nicht zielführend sind. |

Lichtausbreitung

Die Lichtausbreitung wird durch einige Lichtwege angedeutet, die in alle Richtungen von der Lichtquelle ausgehen (siehe Abbildung 52). Die Pfeile tauchen erst beim Verschieben des Schiebereglers auf und werden immer länger. Damit wird die Vorstellung gefördert, dass sich Licht ausgehend von einer Lichtquelle nach und nach in alle Richtungen ausbreitet. Die abstrakte Darstellung wird anschließend dem realen Phänomen einer leuchtenden Lampe in einem AR-Experiment gegenübergestellt und diskutiert (siehe Abbildung 76 im Anhang).

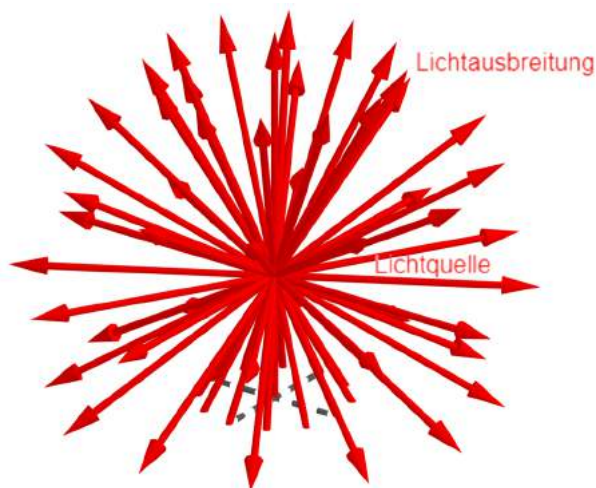


Abbildung 52: Dynamisches Modell zur Lichtausbreitung

| | |
|------------|---|
| Phänomen | Die Kerzenflamme einer brennenden Kerze ist von allen Seiten sichtbar. Wie stellt man die Lichtausbreitung einer Lichtquelle mit Lichtwegen dar? |
| Modell | Eine Lichtquelle wird als ein Punkt im Raum dargestellt. Mit einem Schieberegler werden einige Lichtwege gezeichnet, die die Lichtausbreitung andeuten. |
| Hypothese | Von der Lichtquelle gehen Lichtwege in alle Richtungen aus. |
| Experiment | Eine freistehende Lampe beleuchtet den Raum. Das Modell deutet in AR die Lichtausbreitung an. |
| Ergebnisse | Solange eine Lichtquelle nicht verdeckt wird, breitet sich ihr Licht in alle Richtungen aus. |
| Diskussion | Es werden einige Lichtwege gezeichnet, um die Richtung der Lichtausbreitung anzudeuten. Auch zwischen den dargestellten Pfeilen breitet sich Licht aus. In Modellen werden oft Dinge weggelassen und nur die für das Verständnis des Phänomens notwendigen Teile dargestellt. |

Streuung

Erst nachdem das Licht als Notwendigkeit für den Sehprozess und die Visualisierung von Lichtwegen verstanden wurden, wird die Streuung als ungerichtete

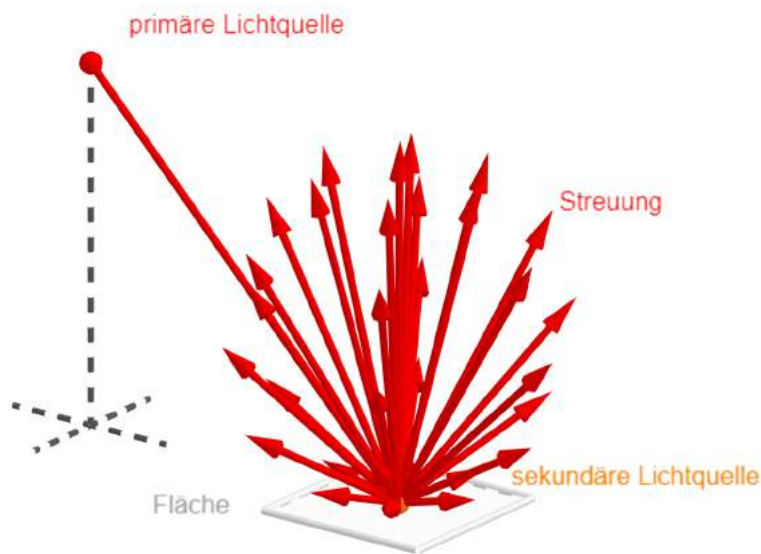


Abbildung 53: Dynamisches Modell zur Streuung

Reflexion thematisiert. Sobald Licht auf eine raue Oberfläche, wie z. B. ein weißes Blatt Papier trifft, wird es in alle Richtungen gestreut (siehe Abbildung 53).⁶⁶ An dieser Stelle werden die Begriffe primäre und sekundäre Lichtquelle eingeführt. Die Darstellung des von der sekundären Lichtquelle ausgehenden Lichts knüpft an die gleichmäßig verteilten Lichtwege im Modell der Lichtausbreitung an. Im Idealfall erfolgt die Streuung unabhängig von der Bestrahlungsrichtung (Lambert-Strahler, siehe Meschede, 2015, S. 586). Das hat zur Folge, dass das meiste Licht immer senkrecht zur Fläche gestreut wird. Die Strahlungsstärke nimmt jedoch mit flacher werdendem Abstrahlwinkel ab, was in der kugelförmigen Lichtstärkeverteilung mit kürzeren Lichtwegen angedeutet wird. Im Experiment wird in einem abgedunkelten Raum zunächst schwarze Pappe und dann weiße Pappe angestrahlt. Damit wird demonstriert, dass selbst schwarze Flächen entgegen der verbreiteten Vorstellung Licht streuen und es nicht komplett absorbieren. Die weiße Pappe erleuchtet die Umgebung jedoch deutlich stärker. Das Phänomen kann wiederum in AR mit der Pfeildarstellung verknüpft werden (siehe Abbildung 77 im Anhang).

⁶⁶ Die materialbedingte Abstrahlung von Licht in alle Richtungen wird auch als *diffuse Reflexion* bezeichnet und mit gerichteter Reflexion an einer unebenen Fläche erklärt. Dieses makroskopische Modell eignet sich jedoch nur für unebene spiegelnde Flächen wie beispielsweise zerknüllte Alufolie. Für die Streuung benötigt man stattdessen mikroskopische Modelle, wo die Streuzentren des Eintrittsmediums keine Vorzugsrichtung aufweisen, was an dieser Stelle des Unterrichts nur qualitativ bzw. phänomenologisch geleistet werden kann. Daran anknüpfend können auch Körperfarben mit dem selektiven Streuverhalten der Materialien eingeführt werden (Haagen-Schützenhöfer & Hopf, 2018, S. 99).

5 Optik mit Modellen und Experimenten

| | |
|------------|--|
| Phänomen | Man kann nicht nur eine Kerzenflamme sehen, sondern auch die Dinge, die von ihr angestrahlt werden. Was passiert, wenn das Licht einer Lichtquelle auf eine Fläche trifft? |
| Modell | Eine Fläche wird mit Licht angestrahlt. Mit einem Schieberegler wird der Lichtweg von der Lichtquelle zur Fläche und darüber hinaus gezeichnet. |
| Hypothese | Trifft Licht einer primären Lichtquelle auf einen Punkt der Fläche, wird dieser Punkt zu einer sekundären Lichtquelle. Von ihm wird das Licht in alle Richtungen gestreut. |
| Experiment | In einem abgedunkelten Raum strahlt eine Lampe auf den Tisch, auf dem sich zunächst schwarze Pappe befindet. Danach wird ein weißes Blatt Papier unter die Lichtquelle geschoben. Das Modell deutet in AR die dabei auftretende Streuung an. |
| Ergebnisse | Die Lampe leuchtet als primäre Lichtquelle. Die angeleuchtete weiße Fläche wird zur sekundären Lichtquelle, die das Licht streut. Dadurch kann man sie in dem abgedunkelten Raum erst sehen. |
| Diskussion | Die angestrahlte schwarze Pappe ist ebenfalls sichtbar. Sie streut also auch Licht, aber nicht so gut wie das weiße Blatt Papier. |

Als Erweiterung des Themas können weitere Papiersorten und Flächen behandelt werden. Mit einer glatten Schutzschicht überzogenes Fotopapier zeigt sowohl ungerichtete Reflexion (Streuung) als auch gerichtete Reflexion. Ein Spiegel hingegen zeigt nur gerichtete Reflexion, was beim Thema Spiegel weiter vertieft wird (siehe Abschnitt „Reflexion“ in Kapitel 5.1.3). Zerknüllte Alufolie demonstriert die diffuse Reflexion. Bei dünnen Papiersorten lässt sich darüber hinaus Transmission beobachten, die mit zunehmender Papierdicke (mehrere Lagen) abnimmt. Weiße Wolken, die von oben aus dem Flugzeug weiß erscheinen und von unten in Abhängigkeit ihrer Dichte auch grau werden können, stellen einen guten realweltlichen Bezug zum Thema der Transmission her.

Sehvorgang

Die Bedeutung des Lichts für den Sehvorgang wird an einem weiteren Modell verdeutlicht, das an das Thema der Mondphasen anknüpft. Solange es eine geradlinige Verbindung von der Lichtquelle zum Objekt und dann zum Empfänger

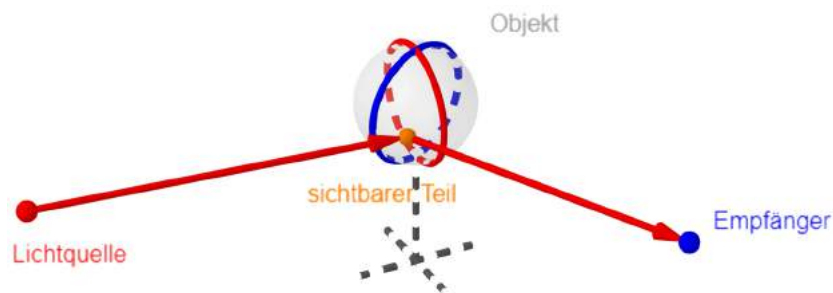


Abbildung 54: Dynamisches Modell zum Sehvorgang

gibt, ist dieser Teil des Objekts für den Empfänger sichtbar (siehe Abbildung 54). Dadurch soll die Vorstellung des Lichtwegs von der Lichtquelle zum Objekt und dann zum Auge gefestigt werden (angelehnt an das Sender-Strahlungs-Empfänger-Konzept nach Wiesner, 1995). Die Pfeilspitzen wirken genauso wie in den bisherigen Modellen der Vorstellung der vom Beobachter ausgehenden „Sehstrahlen“ entgegen (Haagen-Schützenhöfer & Hopf, 2018, S. 97). Bei einem runden Objekt wie dem Mond, der aus verschiedenen Richtungen von der Sonne angeleuchtet wird, können ab- und zunehmende sichtbare Bereiche beobachtet werden, die auch als Mondphasen bekannt sind. Der Schieberegler in dem Modell lässt die Lichtquelle um das Objekt kreisen, sodass diese Erscheinung mit abstrakten Objekten simuliert wird. Im Experiment wird die Situation mit realen Gegenständen zunächst modellhaft nachgestellt und schließlich mit den Aufnahmen des echten Mondes verglichen.

| | |
|-----------|---|
| Phänomen | Im Laufe eines Monats nimmt der sichtbare Teil des Mondes zunächst zu. Nach dem Vollmond nimmt er wieder ab. Wovon hängt es ab, welcher Teil sichtbar ist? |
| Modell | Es wird ein Lichtweg von der Lichtquelle zu einem runden Objekt und dann zum Empfänger gezeichnet. Der rote Kreis trennt die Kugel in eine beleuchtete Seite, die das Licht streut, und eine unbeleuchtete Seite. Der blaue Kreis zeigt die zum Empfänger zu- oder abgewandte Seite an. Mit einem Schieberegler wird die Lichtquelle um das Objekt herumbewegt. |
| Hypothese | Wird die Lichtquelle um das Objekt herumbewegt, dann wandert die beleuchtete Seite des Objekts weiter. Der für den Empfänger sichtbare Teil des Objekts ist beleuchtet und verändert seine Form. |

5 Optik mit Modellen und Experimenten

| | |
|------------|---|
| Experiment | Die Lernenden stellen die Anordnung aus Lichtquelle, Objekt und Empfänger eigenständig mit Styroporkugeln und Taschenlampen in einem abgedunkelten Raum nach. Sie vergleichen ihre Beobachtungen mit animierten Aufnahmen des Mondes. |
| Ergebnisse | Der beleuchtete und dadurch sichtbare Teil der Kugel nimmt genauso wie bei den Mondphasen ab- und zu, je nachdem aus welcher Richtung das Licht kommt. |
| Diskussion | Da im Raum immer etwas Streulicht vorhanden ist, bleiben im Gegensatz zum Mond auch nicht direkt angeleuchtete Objekte sichtbar. |

5.1.2 Schatten

Wird die geradlinige Lichtausbreitung und ihre Darstellung durch Lichtwege akzeptiert, ergeben sich in der Regel wenig Schwierigkeiten mit dem physikalischen Konzept des Schattens. Allerdings kann es auch hier altersabhängige alternative Vorstellungen geben (Haagen-Schützenhöfer & Hopf, 2018, S. 99f). Die beobachteten Schattenflächen auf einer Unterlage oder einem Schirm entstehen hinter einem Hindernis durch fehlendes Licht im Vergleich zu den Stellen außerhalb des Schattens. Der Schatten tritt nicht als Substanz aus dem Gegenstand heraus. Die Form des Schattens hängt von den Lichtverhältnissen und nicht nur von der Form des Gegenstandes ab. Zum Schatten gehört nicht nur die Schattenfläche, sondern der ganze Raum dahinter, da dort kein Licht der Lichtquelle ankommt (Schattenraum). Die Schattenflächen können in der Anwesenheit von mehreren Lichtquellen unterschiedlich hell sein, je nachdem ob mehr oder weniger Licht an einer Stelle hinter dem Hindernis ankommt. Die Unterscheidung in Kern- und Halbschatten lässt sich auf das Thema Übergangsschatten durch ausgedehnte Lichtquellen ausweiten, die im Alltag vorkommen. Der Schatten nimmt bei kleinen Hindernissen die Form der ausgedehnten Lichtquelle an, während kleine Öffnungen ein Bild der Lichtquelle ergeben (Konzept einer Lochkamera). Der Themenbereich wird in die drei Themen Schattenfläche, Kern- und Halbschatten sowie Abbildung aufgeteilt.

Schattenfläche

Als Visualisierung zum physikalischen Konzept der Schattenfläche werden Lichtwege gezeichnet, die von der Lichtquelle ausgehen und die Kanten des Hinder-

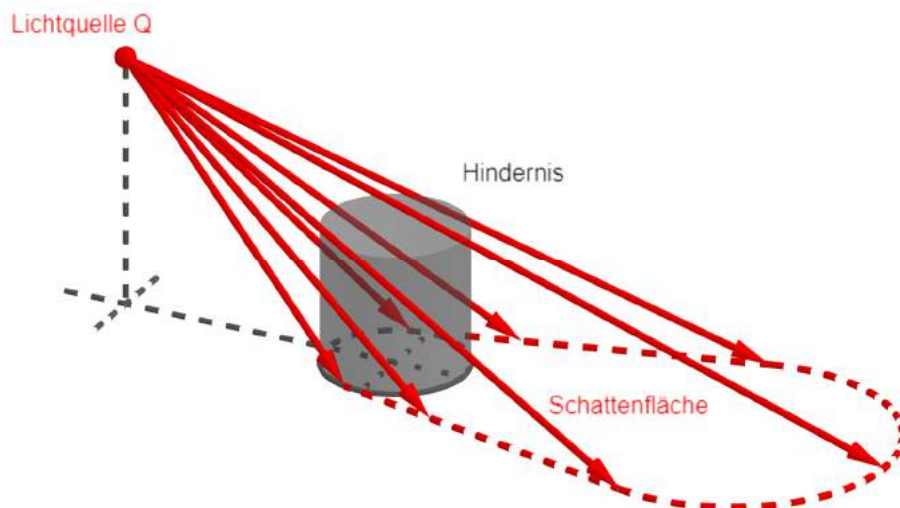


Abbildung 55: Dynamisches Modell zur Schattenfläche

nisses streifen. Sie markieren die Grenze, wohin das Licht der Lichtquelle gelangen kann, und sagen damit helle und dunkle Stellen auf einer Fläche voraus. In dem dynamischen Modell wird eine höhenverstellbare Lichtquelle und ein Zylinder als Hindernis betrachtet (siehe Abbildung 55). Solange die Lichtquelle höher ist als der Zylinder, wird von den eingezeichneten Lichtwegen ein überschaubarer Schattenraum und die dazugehörige Schattenfläche eingegrenzt. Wird die Lichtquelle mit dem Schieberegler bewegt, dann wird der Schattenraum größer oder kleiner und die Form der Schattenfläche verändert sich dementsprechend. Im AR-Experiment wird deutlich, dass die modellierte und reale Schattenfläche ungefähr übereinstimmen. Außerdem wird der Schattenraum von ausgewählten Lichtwegen sichtbar eingegrenzt (siehe Abbildung 78 im Anhang). Um entsprechende Schattenflächen im Experiment zu beobachten, wird eine annähernd punktförmige Lichtquelle benötigt. Halogenlampen haben kurze Glühwendeln und können dadurch selbst bei kurzen Entfernungen klare Schattengrenzen erzeugen. Aktuelle Leuchtmittel bestehen in der Regel aus mehreren ausgedehnten LED-Leuchtfäden, sodass bei genauerer Betrachtung Übergangsschatten ohne klare Grenze beobachtet werden können.

| | |
|----------|--|
| Phänomen | Auf allen Flächen wie dem Tisch, dem Boden oder der Wand können Schatten beobachtet werden. Sie zeigen oft einen verzerrten Umriss eines im Raum befindlichen Objekts. Wovon hängt die Form der Schattenfläche ab? |
| Modell | Es werden Lichtwege von der Lichtquelle Q an einem Hindernis vorbei gezeichnet. Die gestrichelten Linien trennen die Bereiche |

| | |
|------------|---|
| | ab, an denen Licht ankommt und nicht ankommt. Sie bilden die Form der Schattenfläche. Mit einem Schieberegler wird der Abstand der Lichtquelle zum Boden verändert. |
| Hypothese | Wird die Position der Lichtquelle verändert, dann ändert sich auch die Form der Schattenfläche. |
| Experiment | Mit einer Lampe und einem Zylinder wird eine Schattenfläche erzeugt. Das Modell deutet in AR die Lichtwege an, die den Schattenraum eingrenzen und die Schattenfläche bilden. |
| Ergebnisse | Die Schattenfläche hängt von der Form des Hindernisses, aber auch von der Position der Lichtquelle ab. |
| Diskussion | Im Experiment hat die Schattenfläche bei genauerer Betrachtung keine so klare Grenze, wie es im Modell angedeutet wird. Für diesen Zweck muss es erweitert werden. |

Zur eindrücklicheren Demonstration der ohnehin ständig vorhandenen Übergangsschatten kann ein Leuchtmittel mit Milchglas verwendet werden. Je näher ein Objekt an dieser ausgedehnten Lichtquelle ist, desto größer ist der Schatten und desto weicher sind die Kanten. Nur bei großen Entfernungen können solche Lampen näherungsweise als Punktlichtquellen betrachtet werden und es ergeben sich Schatten mit klaren Grenzen. Daraus folgt, dass die bisher vorgenommene Idealisierung nicht für alle Fälle geeignet ist. Bei diesem Phänomen muss die Lichtausbreitung von mehreren Lichtquellen bzw. Leuchtpunkten betrachtet werden. Die Zahl der Lichtquellen wird zunächst auf zwei erhöht.

Kern- und Halbschatten

Die betrachteten Lichtquellen und Lichtwege, die zur Ausbildung von Kern- und Halbschatten führen, werden in die xy-Ebene verlagert. Die Lichtwege werden bis zu einem verschiebbaren Empfänger gezeichnet, solange sie nicht vom Hindernis unterbrochen werden. Die Begriffe Kern- und Halbschatten werden mit der Anzahl der Lichtwege verknüpft, die den Empfänger erreichen (siehe Abbildung 56).⁶⁷ Beim Verschieben des Empfängers werden alle Bereiche nacheinander betrachtet, wobei die Bezeichnung der entsprechenden Schattenfläche dynamisch

⁶⁷ Die Argumentation ist an das *Prinzip Ameise* angelehnt, das in den bereits zitierten phänomenologischen Unterrichtskonzeptionen Anwendung findet. Allerdings wird hier nicht die Wahrnehmung einer hypothetischen Ameise herangezogen. Stattdessen werden Lichtwege

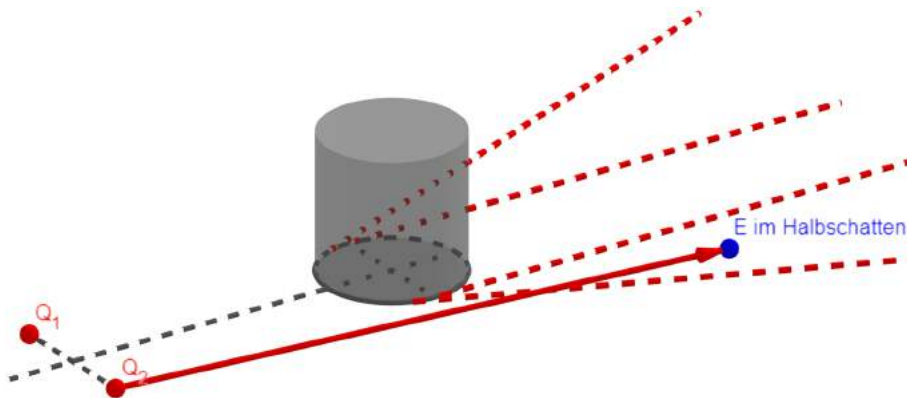


Abbildung 56: Dynamisches Modell zu Kern- und Halbschatten

angepasst wird. Im entsprechenden AR-Experiment können zwei Experimentierleuchten ohne Spaltblende und Linse verwendet werden (siehe Abbildung 79 im Anhang).

| | |
|------------|---|
| Phänomen | Manche Schatten haben eine klare Grenze zwischen hell und dunkel. Andere haben eine dunkle Mitte und hellere Ränder. Wodurch kommen die Helligkeitsunterschiede zustande? |
| Modell | Es werden Lichtwege von zwei Lichtquellen Q_1 und Q_2 zu einem Empfänger E hinter dem Hindernis gezeichnet. Zusätzlich werden Randstrahlen eingezeichnet. Mit einem Schieberegler wird die Position des Empfängers hinter dem Hindernis verändert. |
| Hypothese | Wird der Ort des Empfängers hinter dem Hindernis verändert, so können drei Fälle beobachtet werden: Den Empfänger erreichen zwei Lichtwege (<i>E nicht im Schatten</i>), ein Lichtweg (<i>E im Halbschatten</i>) oder kein Lichtweg (<i>E im Kernschatten</i>). |
| Experiment | Mit zwei Lampen und einem Zylinder werden Kern- und Halbschatten erzeugt. Das Modell deutet in AR mit Lichtwegen und Randstrahlen die verschiedenen Bereiche an. |
| Ergebnisse | Die Helligkeit des Schattens hängt davon ab, wie viel Licht von den Lichtquellen im Raum an dieser Stelle noch ankommt. |

zu einem abstrakten Empfängerpunkt auf der Tischfläche untersucht. Eine vereinfachte Einführung in diese Argumentation lässt sich auch mithilfe eines dynamischen Modells mit dem Hindernis und nur einer Lichtquelle realisieren (siehe Teichrew, 2022b, Schatten), das zur Erläuterung der Gestaltungsempfehlungen herangezogen wurde, aber an dieser Stelle nicht gesondert beschrieben wird.

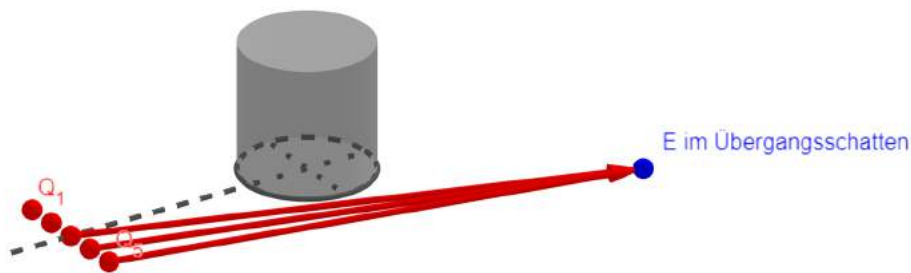


Abbildung 57: Dynamisches Modell zum Übergangsschatten

Diskussion Zwei Lichtquellen reichen nicht aus, um einen Übergangsschatten zu modellieren.

Um sich dem Phänomen des Übergangsschattens weiter anzunähern, enthält eine Modifikation des Modells fünf Leuchtpunkte Q_1 bis Q_5 . Je kleiner die Abstände zwischen den Punkten sind, desto eher entspricht die Konfiguration einer ausgedehnten Lichtquelle. Der Übersichtlichkeit halber werden die Randstrahlen nicht mehr eingezeichnet, sondern nur die Lichtwege der einzelnen Leuchtpunkte zu einem Empfänger hin (siehe Abbildung 57). Das Experiment wird mit einem LED-Leuchtstreifen wiederholt und das erweiterte Modell deutet in AR durch die zu- bzw. abnehmenden Zahl der Lichtwege den weichen Übergang des Schattens an (siehe Abbildung 80 im Anhang). An diesem Thema wird die Existenz alternativer Modelle und die schrittweise Annäherung an ein Phänomen beispielhaft aufgezeigt, was für den Ausbau adäquater Vorstellungen der naturwissenschaftlichen Erkenntnisgewinnung erforderlich ist (siehe These 3 in Kapitel 3.1.2).

Abbildungen an Lochblenden

Als Einstieg in das Thema Abbildungen bietet sich das Phänomen der Sonnentaler an, die durch kleine Öffnungen unter Bäumen entstehen und Abbildungen der Sonne sind (für eine ausführliche Behandlung des Phänomens vgl. Schlichting, 1995). Im Modell wird die Öffnung einer Lochblende konstruiert, durch die einzelne Lichtbündel der aus drei Leuchtpunkten bestehenden Lichtquelle einen Schirm erreichen (siehe Abbildung 58). Das Licht des *oberen* Teils der Lichtquelle erreicht den Schirm *unten* und umgekehrt. Zusammen ergeben die Bildflecke jedoch eine Abbildung der Lichtquelle, die im Modell den Buchstaben L darstellt. Zum Experimentieren im abgedunkelten Klassenraum bieten sich u. a. LED-Ringlichter oder -Leuchtstreifen an, deren runde oder längliche Form durch kleine Öffnungen unabhängig von der Form der Öffnung auf den Schirm

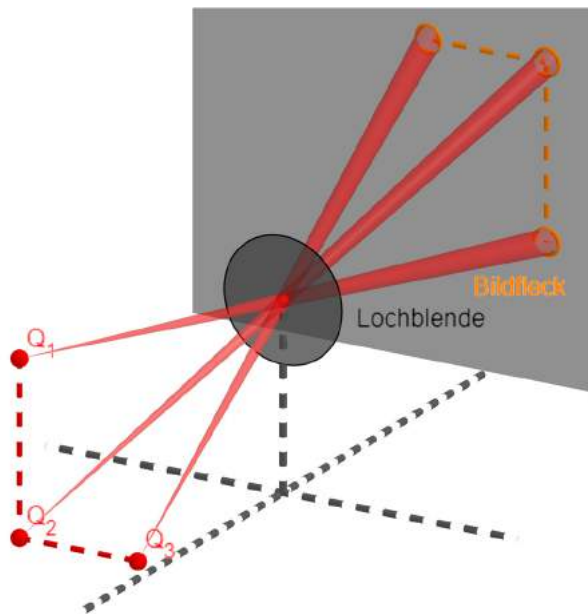


Abbildung 58: Dynamisches Modell zu Abbildungen an Lochblenden

abgebildet werden kann. Lediglich die Form der einzelnen Leuchtpunkte wird von der Form der Öffnung beeinflusst. Als Erweiterung lässt sich der Einfluss der Abstände zwischen Lichtquelle, Öffnung und Schirm auf die Eigenschaften des Bildes diskutieren, wobei das Abbildungsgesetz erst bei der Behandlung der Lochkamera anhand eines vereinfachten dynamischen Modells abgeleitet wird (siehe Kapitel 5.2.1).

| | |
|-----------|---|
| Phänomen | An sonnigen Tagen sieht man unter Bäumen runde Lichtflecke auf dem Boden. Wie entsteht ein solcher Lichtfleck, den man auch Sonnentaler nennt? |
| Modell | Es werden Lichtbündel von drei Leuchtpunkten durch die kleine Öffnung einer Lochblende gezeichnet. Die Anordnung der Punkte ergibt zusammen den Buchstaben L . Jeder Leuchtpunkt bildet auf dem dahinterliegenden Schirm einen Bildfleck. Mit einem Schieberegler wird ein Leuchtpunkt nach oben oder unten verschoben. |
| Hypothese | Wird ein Leuchtpunkt nach oben verschoben, dann wandert der Bildfleck nach unten. Die Anordnung der Bildflecke auf dem Schirm ergibt ebenfalls den Buchstaben L . Er steht jedoch auf dem Kopf (oben und unten vertauscht) und ist seitenverkehrt (links und rechts vertauscht). |

5 Optik mit Modellen und Experimenten

| | |
|------------|---|
| Experiment | Es werden Abbildungen eines Ringlichts und einer Stableuchte an der Wand mithilfe einer kleinen Öffnung erzeugt. |
| Ergebnisse | Die Abbildung an der Wand setzt sich aus vielen Bildflecken zusammen, die zu einzelnen Leuchtpunkten einer ausgedehnten Lichtquelle gehören. |
| Diskussion | Sonnentaler sind als kleine Abbildungen der Sonne zu verstehen. Die Form der Öffnung hat keinen Einfluss auf die Form der Abbildung, solange die Öffnung klein genug ist. |

5.1.3 Spiegel

Im Alltag sind oft Spiegelungen an glatten Flächen aus Glas, Metall oder Plastik zu sehen, aber selten werden die Eigenschaften dieser Spiegelbilder gezielt untersucht. Das Reflexionsgesetz ist zwar ein fester Bestandteil des Optikunterrichts, es führt allerdings nicht automatisch zu einem konzeptuellen Verständnis darüber, was beim täglichen Blick in den Spiegel geschieht. So ergeben sich auch zu diesem Themenbereich viele Verständnisschwierigkeiten, die besonders durch die Vorstellung geprägt werden, dass der Spiegel etwas „sieht“, also seine Umgebung aktiv erfasst (Haagen-Schützenhöfer & Hopf, 2018, S. 103ff). Das physikalische Konzept zum Spiegelbild basiert im Gegensatz dazu auf der Betrachtung des von Objekten gestreuten Lichts, das der Spiegel in bestimmte Richtungen reflektiert. Für einen Empfänger sieht es dann so aus, als ob sich das reflektierte Licht aus einem Ort hinter dem Spiegel ausbreitet. Das Spiegelbild eines Gegenstandes befindet sich deshalb scheinbar hinter dem Spiegel und liegt nicht, wie von vielen Lernenden angenommen, auf der Spiegelfläche. Da sich die Lichtwege nicht tatsächlich, sondern nur in rückwärtiger Verlängerung kreuzen, ist das Spiegelbild ein virtuelles Bild. Die Position des Spiegelbildes hängt von der Position des gespiegelten Objekts ab und nicht von der Position des Beobachters. Wenn das im Spiegel betrachtete Objekt und der Empfänger denselben Abstand zur Spiegelfläche aufweisen, dann ergibt sich eine besondere Konfiguration, die uns im Alltag ständig begegnet, wenn wir uns selbst im Spiegel betrachten: Der Spiegel muss mindestens halb so groß sein wie der Körper, um sich komplett im Spiegel zu sehen. Darüber hinaus hängt der sichtbare Ausschnitt des eigenen Körpers nicht vom Abstand zum Spiegel ab. Die verbreitete Idee, durch mehr Abstand mehr vom eigenen Körper im Spiegel zu sehen, hängt mit der Vorstellung der aktiven Erfassung der Umgebung durch den Spie-

gel zusammen. Vermutlich hat auch die Ähnlichkeit der Situation mit der Aufnahme eines Selbstporträts mit dem Smartphone einen Einfluss auf die Verbreitung dieser Vorstellung. Durch den alltäglichen Fokus auf die Betrachtung des eigenen Körpers im Spiegel entsteht zudem die Vorstellung, dass der Spiegel links und rechts vertauscht: Sobald sich eine Person gedanklich in ihr Spiegelbild hineinversetzt, befindet sich der rechte Arm links, aber ein Pfeil, der nach rechts zeigt, zeigt – von außen betrachtet – auch im Spiegel nach rechts. Ein Pfeil, der nach vorne zum Spiegel zeigt, zeigt im Spiegel in die entgegengesetzte Richtung, sodass der Spiegel vorne und hinten vertauscht. Die zum Spiegel vorgestellten Modelle und Experimente behandeln die Themen Reflexion, Spiegelbild und Spiegelgröße.

Reflexion

Das Thema (gerichtete) Reflexion knüpft an das Thema Streuung an, die zuvor als ungerichtete Reflexion eingeführt wurde. Deshalb wird die bereits bekannte Anordnung, bei der Licht auf die untersuchte Fläche auf dem Tisch trifft, im Modell und Experiment beibehalten. Erfahrungen mit spiegelnden Flächen wie z. B. Armbanduhren, durch die das Licht der Sonne manchmal an die Decke oder in die Augen gelenkt wird, sind aus dem Alltag bekannt. In Form eines Signalspiegels hat dieses Phänomen auch eine Anwendung, die zur Einführung thematisiert werden kann. Im Vergleich zur Streuung gehen in dem dynamischen Modell zur Reflexion nicht mehrere Lichtwege von dem Auftreffpunkt in verschiedene Richtungen aus, sondern nur ein Lichtweg in eine bestimmte Richtung (siehe Abbildung 59). Hinzu kommen fachspezifische Hilfslinien und Kennzeichnungen, wie das Lot oder die Angabe der Winkel. Die Veränderung des Einfallswinkels mit einem Schieberegler führt zur Änderung des Reflexionswinkels. Im Experiment ist genauso wie im Alltag nur der Lichtfleck an der Decke zu sehen. Wo er sich befindet, wird durch das Reflexionsgesetz bestimmt, das in die Konstruktion des Modells eingeflossen ist. Werden Modell und Experiment in AR in Einklang gebracht, wird der ansonsten unsichtbare Lichtweg visualisiert. Außerdem deutet die gestrichelte Verlängerung in die Richtung des Lichtflecks an der Decke (siehe Abbildung 81 im Anhang).

| | |
|----------|---|
| Phänomen | Wenn Licht auf eine spiegelnde Fläche trifft, dann ändert es seine Ausbreitungsrichtung. Das Licht der Sonne lässt sich auf diese Weise in eine bestimmte Richtung lenken. Wovon hängt es ab, wohin das Licht reflektiert wird? |
|----------|---|

5 Optik mit Modellen und Experimenten

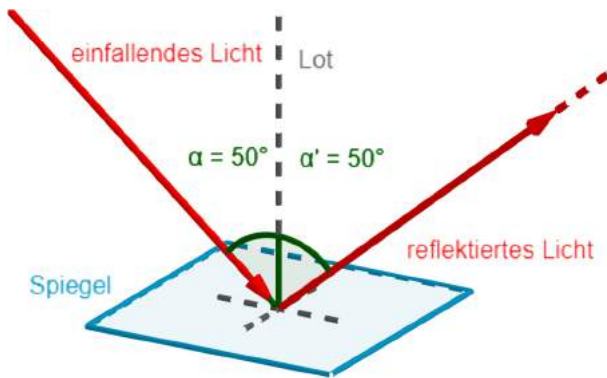


Abbildung 59: Dynamisches Modell zur Reflexion

| | |
|------------|---|
| Modell | Das Licht einer Lichtquelle trifft auf einen Spiegel und wird reflektiert. Senkrecht zur Spiegelfläche wird das Lot konstruiert, an dem der Einfallswinkel α gemessen wird. Mit einem Schieberegler wird der Einfallswinkel verändert. |
| Hypothese | Wird der Einfallswinkel α größer, dann nimmt auch der Reflexionswinkel α' zu. Das einfallende Licht, das Lot und das reflektierte Licht liegen dabei in einer Ebene. Der Einfallswinkel und der Reflexionswinkel sind zudem gleich groß ($\alpha = \alpha'$). |
| Experiment | Eine Lampe strahlt ein paralleles Lichtbündel auf eine Spiegelfläche auf dem Tisch. An der Decke ist ein Lichtfleck zu sehen. Das Modell deutet in AR nach der Einstellung des Einfallswinkels die Richtung des reflektierten Lichts an. |
| Ergebnisse | Die Richtung des reflektierten Lichts hängt davon ab, unter welchem Winkel das Licht auf den Spiegel trifft. Das Reflexionsgesetz beschreibt den Zusammenhang zwischen Einfallswinkel und Reflexionswinkel. |
| Diskussion | Das Modell zeigt, wie der Spiegel einfallendes Licht ablenkt. Das erklärt aber nicht, wie das Spiegelbild im Spiegel zustande kommt. |

Spiegelbild

Um Lichtquelle, Spiegel und Empfänger zunächst unabhängig voneinander zu betrachten, wird das Spiegelbild anhand von gespiegelten Objekten und nicht anhand des eigenen Spiegelbildes als Phänomen eingeführt. Außerdem reicht ein am Spiegel reflektierter Lichtweg aus dem vorherigen Modell nicht aus, um

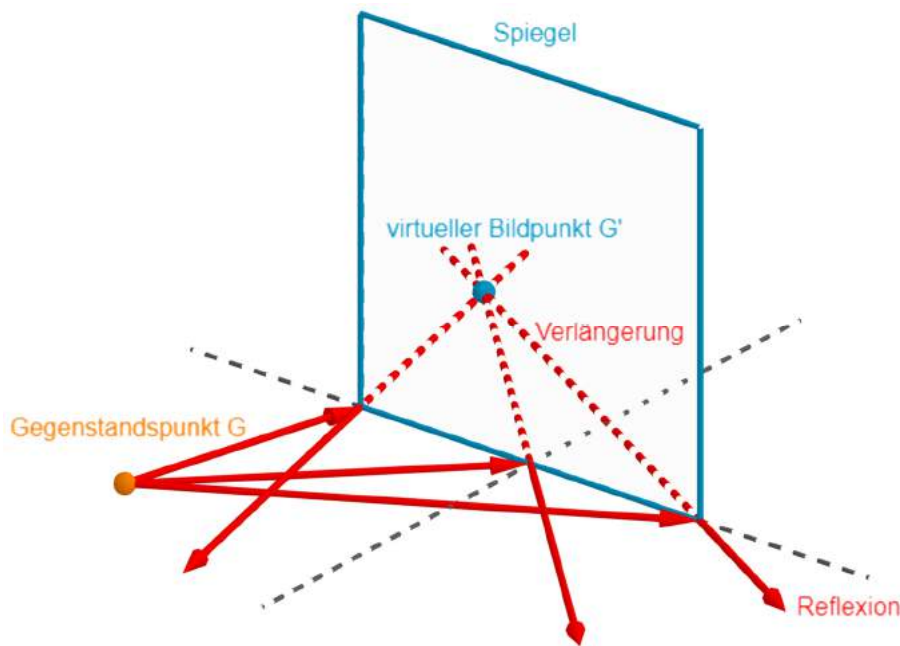


Abbildung 60: Dynamisches Modell zum Spiegelbild

des scheinbaren Orts des Spiegelbildes zu modellieren. Dafür müssen mindestens zwei auf den Spiegel auftreffende Lichtwege skizziert werden (Wiesner, Engelhardt & Herdt, 1993, S. 11). Das Modell zum Spiegelbild enthält zwei Lichtwege zu den Rändern des Spiegels und einen in Richtung des Mittelpunkts.⁶⁸ Die reflektierten Lichtwege werden rückwärtig verlängert, da die Änderung der Ausbreitungsrichtung des Lichts für das Auge nicht zu erkennen ist. Die Verlängerungen schneiden sich in einem Punkt hinter dem Spiegel, an dem sich das Spiegelbild für einen Empfänger scheinbar befindet (virtuelles Bild, siehe Abbildung 60). Um das Spiegelbild zu sehen, muss sich er sich im Bereich des reflektierten Lichts aufhalten. Mit einem Schieberegler können die Phasen (a) Lichtausbreitung, (b) Reflexion, (c) Verlängerung und (d) Schnittpunkt nach und nach durchlaufen werden, was dem Aufbau eines entsprechenden mentalen Modells zugutekommt. Im Experiment lässt sich mithilfe von AR die Gültigkeit der theoretischen Überlegungen bezüglich der verlängerten Lichtwege und des Ortes des Spiegelbildes demonstrieren (siehe Abbildung 82 im Anhang).

Phänomen Wenn man in einen Spiegel blickt, dann sieht man Spiegelbilder der Gegenstände, die sich darin spiegeln. Wie kommt das Spiegelbild zustande?

⁶⁸ Dynamische Modelle zum Spiegelbild wurden bereits in verschiedenen Ausführungen anderweitig beschreiben (vgl. Teichrow & Erb, 2020d, 2021a).

5 Optik mit Modellen und Experimenten

| | |
|------------|--|
| Modell | Das Licht eines Gegenstandspunktes G trifft auf einen Spiegel und wird nach dem Reflexionsgesetz reflektiert. Mit einem Schieberegler werden die drei gezeichneten Lichtwege des reflektierten Lichts hinter den Spiegel als gestrichelte Linien verlängert. |
| Hypothese | Werden die Lichtwege hinter den Spiegel verlängert, dann schneiden sie sich in einem Punkt. Dieser Punkt markiert den Ort, an dem sich das Spiegelbild des <i>Gegenstandspunktes</i> G befindet. Es wird als <i>virtueller Bildpunkt</i> G' bezeichnet, da sich nur die Verlängerungen der Lichtwege schneiden. |
| Experiment | Eine Münze liegt vor einem Spiegel auf einer karierten Unterlage. Im Spiegel ist das Spiegelbild der Münze sichtbar. Das Modell deutet in AR nach der Ausrichtung des Spiegels und Einstellung des Gegenstandspunktes den Ort des Spiegelbildes an. |
| Ergebnisse | Die Verlängerungen der Lichtwege kreuzen sich sichtbar über dem Spiegelbild. Das Spiegelbild liegt hinter dem Spiegel. Es ist sichtbar, solange sich der Empfänger im durch die äußeren zwei Lichtwege eingegrenzten Bereich des reflektierten Lichts aufhält. Im Modell und an der karierten Unterlage im Experiment lässt sich im Übrigen ablesen, dass der Abstand des Spiegelbildes zum Spiegel dem Abstand des Gegenstandes zum Spiegel entspricht. |
| Diskussion | Man braucht mindestens zwei Lichtwege, die von einem Gegenstandspunkt ausgehen, um den Ort des Spiegelbildes zu bestimmen. Wenn sich die in verschiedene Richtungen auseinanderlaufenden Lichtwege einer Lichtquelle wieder kreuzen, dann markieren sie Orte, an denen sich reelle Bilder befinden. Wenn es ihre Verlängerungen tun, dann handelt es sich um virtuelle Bilder, die nur mit dem Auge gesehen werden können. |

Spiegelgröße

Die Behandlung dieses Themas wird durch die verbreitete Vorstellung motiviert, dass der Abstand zum Spiegel darüber entscheidet, wie viel eine Person von sich selbst im Spiegel sehen kann. Allerdings ist die Spiegelgröße der entscheidende Faktor. Ein Taschenspiegel, der für die Betrachtung des eigenen Gesichts geeignet sein soll, muss mindestens halb so groß sein. Dieser Zusammenhang folgt

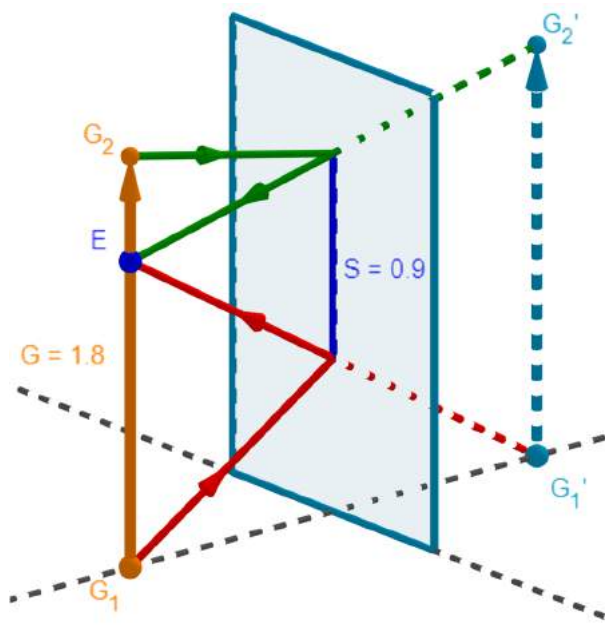


Abbildung 61: Dynamisches Modell zur Spiegelgröße

aus einem Modell, in dem das Spiegelbild eines aufrechten Gegenstandes konstruiert wird, der als Pfeil in Orange vor dem Spiegel dargestellt ist. Das Spiegelbild ist ein hellblau gestrichelter Pfeil hinter dem Spiegel. Hinzu kommen Lichtwege in Grün und Rot, die von der Spitze und dem Fuß des Gegenstandes zu einem Empfänger führen, der sich auf dem Gegenstand befindet (siehe Abbildung 61). Anhand der Größenangaben im Modell lässt sich erkennen, dass die Punkte auf dem Spiegel, an denen das von den Enden des Gegenstandes ausgehende Licht zum Empfänger hin reflektiert wird, einen Abstand von der halben Gegenstandsgröße haben. Das heißt im Umkehrschluss, dass für ein vollständiges Spiegelbild der Spiegel nur halb so groß sein muss. Der Mehrwert eines dynamischen Modells wird an diesem Thema besonders deutlich, da der Gegenstand mit einem Schieberegler zum Spiegel hin- oder vom Spiegel wegbewegt werden kann. Die benötigte Spiegelgröße ändert sich durch diese Variation nicht. Um sich von diesem Sachverhalt auch in einem Experiment mit den eigenen Augen zu vergewissern, bieten sich Taschenspiegel an, die mit einer karierten Folie beklebt werden. Ein ausgeschnittener oder 3D-gedruckter Pfeil, der beispielsweise 6 cm lang ist, wird dicht neben das Auge gehalten. Das vollständige Spiegelbild des Pfeils wird bereits auf 3 cm des Spiegels zu sehen sein. Es lässt sich allerdings auch ein AR-Experiment mithilfe des Modells und des eigenen Körpers vor einem großen Spiegel durchführen. Die Kamera des Mobilgeräts wird in AR an der Stelle des Empfängers positioniert, sodass die Größe des Spiegelbildes hinter dem Spiegel und die auf dem Spiegel markierte Spiegelgröße perspektivisch übereinstimmen (siehe Abbildung 83 im Anhang).

| | |
|------------|---|
| Phänomen | Taschenspiegel sind nicht besonders groß, sodass man sie überall mitnehmen kann. Man kann mit ihnen das Gesicht, aber nicht den ganzen Körper sehen. Wie groß muss ein Spiegel sein, um sich komplett darin zu sehen? |
| Modell | Es wird ein Gegenstand der Größe G an einer Spiegelebene gespiegelt. Vom oberen und unteren Ende des Pfeils werden Lichtwege zu einem Empfänger E gezeichnet. Der Empfänger befindet sich im gespiegelten Gegenstand, genauso wie die Augen zum Körper gehören. Die Strecke S gibt die benötigte Spiegelgröße an, damit der Empfänger den Gegenstand komplett sehen kann. Mit einem Schieberegler kann der Abstand des Gegenstandes zum Spiegel verändert werden. |
| Hypothese | Wird der Abstand des Gegenstandes zum Spiegel größer oder kleiner, dann bleibt die benötigte Spiegelgröße gleich. |
| Experiment | Eine karierte Folie auf einem Spiegel erlaubt, die benötigte Spiegelgröße des eigenen Gesichts oder eines neben das Auge gehalten Gegenstandes zu bestimmen. Das Modell deutet in AR mit Lichtwegen die benötigte Spiegelgröße des beobachteten Spiegelbildes an. |
| Ergebnisse | Die benötigte Spiegelgröße ist halb so groß wie der Gegenstand. Man kann auch nicht mehr von seinem eigenen Körper sehen, wenn man den Spiegel weiter weghält. |
| Diskussion | Das Ergebnis entspricht nicht der alltäglichen Überzeugung vieler Personen. Es sind sowohl theoretische Konstruktionen als auch praktische Experimente notwendig, um wissenschaftliche Vorstellungen aufzubauen. |

5.2 Geometrische Optik

Im vorherigen Kapitel wurde unter dem Sammelbegriff der Anfangsoptik eine Reihe an optischen Phänomenen mit realweltlichem Bezug diskutiert. Die *geometrische Optik* beschäftigt sich klassischerweise „mit der Wechselwirkung von Licht an Grenzflächen und mit der Ausbreitung von Licht durch optische Vorrichtungen“ in einer Art und Weise, die näher an der fachlichen Systematik ist (Winkelmann, 2020, S. 3). Wesentliche Inhalte bilden das Abbildungs-, Reflexions-,

und Brechungsgesetz sowie die Linsengleichung. Hinzu kommt die Behandlung bzw. der Bau der Lochkamera (siehe Kapitel 5.2.1). Außerdem lässt sich mit dem Fermatschen Prinzip als Exkurs eine abstrakte Idee zum Verhalten des Lichts heranziehen, mit der bereits bekannte Sachverhalte wie die geradlinige Lichtausbreitung und das Reflexionsgesetz nachvollzogen und neue Aussagen zum Verhalten des Lichts an Grenzflächen gemacht werden (siehe Kapitel 5.2.2). Die tiefergehende Beschäftigung mit den Themen Brechung und Totalreflexion in Kapitel 5.2.3 führt schließlich zum Thema optische Abbildungen durch Linsen (siehe Kapitel 5.2.4). Die für diesen Teil erstellten dynamischen Modelle wurden ebenfalls zu einem GeoGebra-Buch zusammengefasst (Teichrow, 2022c).⁶⁹ Da in diesem Teil fachliche Zusammenhänge und Gesetze im Vordergrund stehen, wird nicht der komplette Erkenntnisweg vom Phänomen bis zur Diskussion beschrieben. Als wesentliche Elemente der Erkenntnisgewinnung bleiben Modelle, die theoretische Aussagen beinhalten, und Experimente, die zu ihrer Überprüfung dienen.

5.2.1 Lochkamera

Das Modell zur Abbildung an einer Lochblende greift bereits die Ausbreitung von Lichtbündeln durch Öffnungen auf (siehe Abschnitt „Abbildungen an Lochblende“ in Kapitel 5.1.2). Die einzelnen Bildflecke ergeben zusammengenommen ein Bild der Lichtquelle, das auf dem Kopf steht und seitenverkehrt ist. Dieses Prinzip wird beim Bau einer Lochkamera ausgenutzt, wobei mit einem beweglichen Schirm die Bildgröße beeinflusst werden kann. Nach der Einführung der Fachbegriffe Gegenstands- und Bildgröße am Spiegel bietet sich in diesem Zusammenhang an, die Gegenstands- und Bildweite hinzuzunehmen und anhand eines dynamischen Modells das Abbildungsgesetz aufzustellen. Im Modell wird ein orangener Pfeil als Gegenstand in Anlehnung an die Gestaltung der Modelle im Themenbereich Spiegel betrachtet. Die Öffnung wird im Vergleich zur Ausdehnung des Gegenstandes als sehr klein angenommen, sodass nur einzelne Lichtwege

⁶⁹ Das GeoGebra-Buch kann mithilfe des folgenden QR-Codes aufgerufen werden:



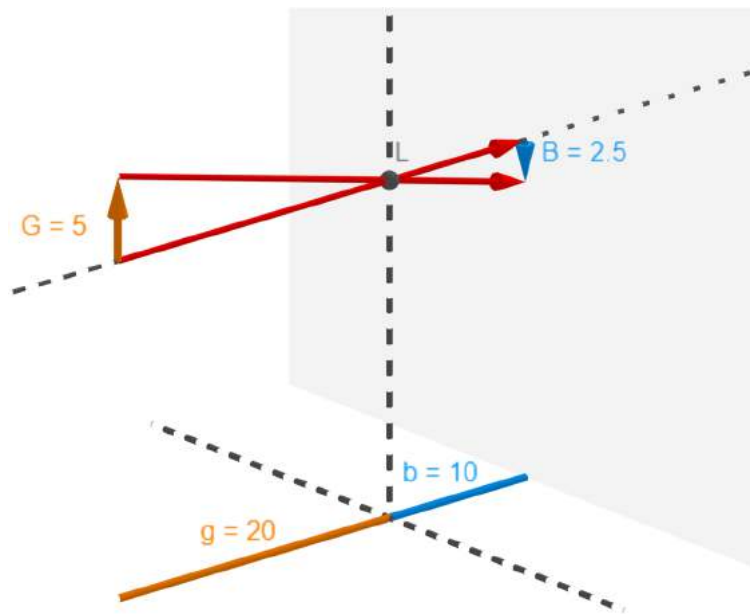


Abbildung 62: Dynamisches Modell zur Lochkamera

konstruiert werden, die von den Enden des Gegenstandes durch das Loch im Punkt L auf die andere Seite gelangen. Das Licht trifft auf eine Streufläche als Schirm auf und kann von dort ins Auge gelangen. Zwischen den Auftreffpunkten erstreckt sich demnach das Bild des Gegenstandes als hellblauer Pfeil. Das Bild ist zunächst halb so groß wie der Gegenstand, was mit der halb so großen Bildweite b im Vergleich zur Gegenstandsweite g erklärt werden kann (siehe Abbildung 62). Mit einem Schieberegler lässt sich die Bildweite variieren, sodass der Zusammenhang

$$\frac{B}{G} = \frac{b}{g} \quad \{1\}$$

nachvollzogen werden kann.

Im Experiment mit einem selbstleuchtenden Gegenstand (z. B. einer beleuchteten Perl-Eins), einer Irisblende und einem Schirm auf der optischen Bank lässt sich das *Abbildungsgesetz* in {1} u. a. auch in AR überprüfen. Indem das Modell und der Aufbau in Einklang gebracht werden, werden nicht nur die für die Bildentstehung verantwortlichen Lichtwege der obersten und untersten Leuchtpunkte visualisiert. Die modellierte Bildgröße entspricht auch ungefähr der beobachteten Bildgröße auf dem Schirm (siehe Abbildung 84 im Anhang). Außerdem lässt sich im Experiment der Einfluss der Größe und der Form des Lochs auf das Bild untersuchen, sodass die Grenzen des Modells aufgrund der zuvor vorgenommenen Idealisierung deutlich werden.

5.2.2 Fermatsches Prinzip

In Anlehnung an Erb (1992) wird das Fermatsche Prinzip als ein allgemeines Erklärungsprinzip herangezogen, aus dem als Grundaussage das Reflexions- und Brechungsgesetz abgeleitet werden können. Es wird schrittweise anhand von drei verschiedenen Modellen erarbeitet, dass das Licht (a) sich bekanntlich geradlinig ausbreitet und somit scheinbar den kürzesten Weg nimmt, (b) von spiegelnden Flächen reflektiert wird und der kürzeste Lichtweg genau dort einen Knick hat, wo Einfallswinkel und Reflexionswinkel gleich groß sind, und (c) seine Ausbreitungsrichtung beim Übergang von einem transparenten Medium in ein anderes ändert, da die Ausbreitungsgeschwindigkeit in verschiedenen Medien unterschiedlich groß ist. Es nimmt damit nicht den geometrisch kürzesten Weg, sondern den Weg mit der kürzesten Laufzeit. Genauer gesagt nimmt das Licht den Weg, auf dem sich seine Laufzeit bei kleinen Variationen nicht wesentlich ändert (Fermatsches Prinzip).

Länge des geradlinigen Lichtwegs

Als Ausgangspunkt dient ein Modell zum Schatten, das eine Punktlichtquelle Q und den Zylinder als Hindernis aufweist. Auf einem der beiden gestrichelten Randstrahlen werden außerdem der Empfänger E und ein Punkt P zwischen Q und E konstruiert (siehe Abbildung 63). Mit einem Schieberegler lässt sich P senkrecht zur Verbindungslinie von Q und E verschieben, sodass sich die Längen der beiden Strecken

$$s_1 = \overline{QP} \quad \text{und} \quad s_2 = \overline{PE} \quad \{2\}$$

kontinuierlich ändern. Die Länge des Lichtwegs wird als Summe der Teilstücke ausgegeben. Befindet sich P genau auf der geraden Verbindungslinie zwischen Q und E (geradlinige Lichtausbreitung), ist der Lichtweg minimal. Wird er verschoben, nimmt die Länge des Lichtwegs zu.

Die im Modell visualisierte Anordnung lässt sich im Experiment nachstellen, sodass die Untersuchung der Länge möglicher Lichtwege in AR erfolgen kann (siehe Abbildung 85 im Anhang). Das Fermatsche Prinzip wird dadurch zunächst in einer vereinfachten Form anhand der realen Beobachtung eingeführt.

Länge des reflektierten Lichtwegs

Im nächsten Schritt wird das Modell zum Spiegelbild wieder aufgegriffen (siehe Abschnitt „Spiegelbild“ in Kapitel 5.1.3). Allerdings verläuft hier der Lichtweg von

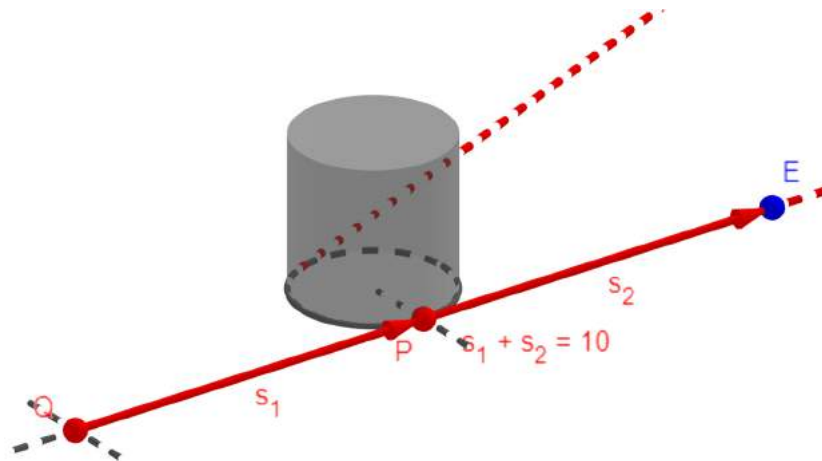


Abbildung 63: Dynamisches Modell zur Länge des geradlinigen Lichtwegs

Q über P zu E , wobei sich P auf der Spiegelachse befindet. Mit einem Schieberegler wird P auf der Spiegelachse verschoben, sodass sich auch hier die Längen von s_1 und s_2 verändern (siehe {2}). Ihre Summe wird minimal, wenn Einfallswinkel α und Reflexionswinkel α' gleich sind (siehe Abbildung 64).

Auch dieses Modell lässt sich in AR an reale Gegebenheiten anpassen. Als Lichtquelle wird ein schmales Lichtbündel einer Experimentierleuchte oder ein Linienlaser verwendet. Zunächst werden die Punkte Q und E an der realen Leuchtspur ausgerichtet. Danach wird P entlang der Spiegelachse verschoben, bis er an der Stelle ankommt, an der die Leuchtspur einen Knick macht (siehe Abbildung 86 im Anhang). Dadurch lässt sich das *Reflexionsgesetz* nicht nur durch die direkte Messung legitimieren, sondern auch aus der vorher eingeführten, vereinfachten Variante des Fermatschen Prinzips ableiten.

Optische Weglänge des gebrochenen Lichtwegs

Zuvor wurden im Rahmen der Anfangsoptik bereits behandelte Sachverhalte wie die geradlinige Lichtausbreitung oder das Reflexionsgesetz aufgegriffen und vor dem Hintergrund des Fermatschen Prinzips modelliert. Im letzten Schritt wird es genutzt, um eine Vorhersage bezüglich des Verhaltens von Licht beim Übergang von einem transparenten Medium (z. B. Luft) in ein anderes (z. B. Wasser oder Acrylglas) abzuleiten.

Zunächst wird theoretisiert, dass der geometrisch kürzeste Lichtweg auf der geraden Verbindung zwischen Q in einem Medium und E in einem anderen Medium liegen würde. Allerdings kann es Gründe geben, von dem kürzesten Weg abzuweichen. Hierbei bietet sich die bekannte Analogie mit einer Person an, die eine

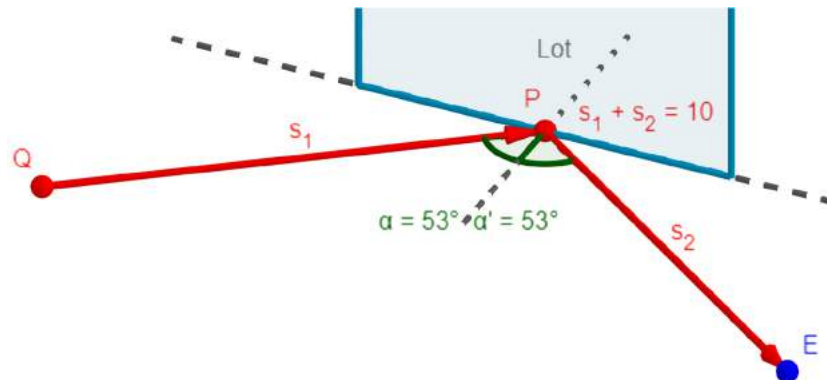


Abbildung 64: Dynamisches Modell zur Länge des reflektierten Lichtwegs

andere aus dem Wasser retten möchte. Da die Geschwindigkeit auf dem Land schneller ist als im Wasser, ist der am Ufer zurückgelegte Weg intuitiv etwas länger als die restliche Strecke im Wasser. In der Summe führt diese Taktik schneller ans Ziel als der direkte Weg. Wird von unterschiedlichen Werten für die Lichtgeschwindigkeit c in unterschiedlichen Medien ausgegangen, bietet es sich an, diese Idee auf das Verhalten von Licht an Grenzflächen zu übertragen. Dafür wird zunächst der Brechungsindex

$$n = \frac{c_0}{c} \geq 1 \quad \{3\}$$

definiert, wobei c_0 für die (maximale) Lichtgeschwindigkeit im Vakuum steht. Außerdem wird die optische Weglänge

$$OWL = s \cdot n \geq s \quad \{4\}$$

eingeführt, wobei s wiederum für die geometrische Länge des Lichtwegs steht.

In dem Modell, das sich mit der Lichtbrechung mithilfe des Fermatschen Prinzips befasst, lassen sich nach dem bereits bekannten Prinzip verschiedene Lichtwege zwischen Q und E über den Punkt P vergleichen, der sich auf der Grenzfläche zwischen zwei Medien mit den Brechungsindizes n_1 und n_2 befindet (siehe Abbildung 65). Statt der üblichen Summe werden die optischen Weglängen der beiden Abschnitte aufsummiert und für jede Position von P ausgegeben. Mit einem Schieberegler wird P auf der Grenzfläche verschoben, bis der Wert minimal ist. Bei unterschiedlichen Brechungsindizes und für den Fall, dass die Verbindungslinie zwischen Q und E nicht senkrecht auf der Grenzfläche steht, wird der Lichtweg stets einen Knick – je nach Verhältnis der Brechungsindizes – in die eine

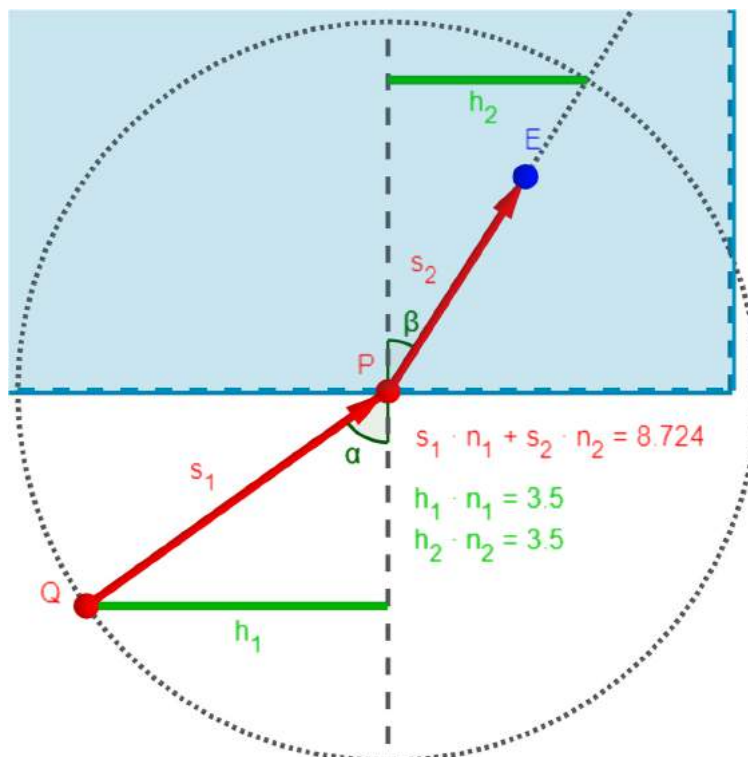


Abbildung 65: Dynamisches Modell zur optischen Weglänge des gebrochenen Lichtwegs

oder andere Richtung aufweisen.⁷⁰ Ist darüber hinaus eine Vorhersage des Brechungswinkels β in Abhängigkeit vom Einfallswinkel α gewünscht, vergleicht man die Produkte

$$h_1 \cdot n_1 \quad \text{und} \quad h_2 \cdot n_2, \quad \{5\}$$

wobei h_1 und h_2 die Gegenkatheten zu den Winkeln α und β darstellen. Für verschiedene Parameter lässt sich zeigen, dass für einen Lichtweg mit der kürzesten Laufzeit (OWL minimal) das vereinfachte *Brechungsgesetz* gilt:

$$h_1 \cdot n_1 = h_2 \cdot n_2. \quad \{6\}$$

Inwiefern das mit der optischen Weglänge verfeinerte Fermatsche Prinzip die Lichtbrechung vorhersagt, lässt sich im Experiment mit einem Linienlaser und einem Quader aus Acrylglas zeigen. Im Modell müssen dafür die Brechungsindizes für Luft als $n_1 = 1$ und für das im Experiment verwendete Acrylglas als $n_2 = 1,49$ eingestellt werden. In AR werden zunächst die Punkte Q und E entlang

⁷⁰ An dieser Stelle können qualitative Aussagen zur Brechung formuliert werden: Beim Übergang von optisch dünneren Medien in optisch dichtere ($n_1 < n_2$) wird das Licht zum Lot hin gebrochen. Beim Übergang von optisch dichteren Medien in optisch dünnere ($n_2 < n_1$) wird das Licht vom Lot weg gebrochen.

der realen Leuchtpur ausgerichtet. Danach kann gezeigt werden, dass die optische Weglänge genau dann minimal wird, wenn P an die Stelle geschoben wird, an der das Licht die Grenzfläche trifft und der Lichtweg einen Knick macht (siehe Abbildung 87 im Anhang). Das Modell beschreibt somit die Brechung des Lichts mithilfe der unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeiten in verschiedenen Medien.⁷¹ Darüber hinaus sagt es für bekannte Brechungsindizes voraus, wie stark das Licht bei einem gegebenen Einfallswinkel gebrochen wird.

5.2.3 Brechung und Totalreflexion

Das aus dem Fermatschen Prinzip abgeleitete Brechungsgesetz erlaubt im weiteren Unterrichtsverlauf, Modelle zu konstruieren und zu verwenden, die den Lichtweg durch verschiedene geometrische Formen visualisieren. In diesem Kapitel werden Halbkreisscheibe und Quader verwendet.⁷² Sie sind so konstruiert, dass bei jedem Übergang der Einfallswinkel gemessen und der Brechungswinkel bestimmt wird, um den weiteren Verlauf des Lichts zu zeigen. An gekrümmten Flächen wird zunächst das Lot senkrecht zur Tangente der Kurve konstruiert und anschließend die Winkel bestimmt. Die visualisierten Lichtwege werden wiederum dazu genutzt, um solche beobachtbaren Phänomene wie die optische Hebung und Totalreflexion zu verstehen.

Lichtweg durch eine Halbkreisscheibe

Obwohl Lernende an dieser Stelle des Unterrichts keine eigenständigen Berechnungen zum Brechungsgesetz in seiner üblichen Form

$$\sin(\alpha) \cdot n_1 = \sin(\beta) \cdot n_2 \quad \{7\}$$

aufgrund der fehlenden mathematischen Grundlagen zum Sinus eines Winkels anstellen können, sollten trotzdem Messungen zur Brechung an der Halbkreisscheibe vorgenommen werden. Das Experiment stellt eine gute Einführung in das praktische wissenschaftliche Arbeiten dar: Die Lernenden geben systematisch Einfallswinkel vor, lesen sauber die Brechungswinkel an der Skala einer

⁷¹ Dasselbe Ergebnis lässt sich im Übrigen auch mithilfe einer realweltlichen Analogie erreichen: Ein zweispuriges Fahrzeug, das schräg von einem glatten Streckenabschnitt auf einen rauen wechselt, wird zunächst nur auf einer Seite abgebremst und macht dadurch einen Schwenk in Richtung der rauen Fläche. Als Beispiele kommt ein Schlitten beim Übergang von Eis auf Schnee oder ein Rollwagen beim Übergang von Asphalt auf Rasen in Frage. Bis zur Einführung des Wellenmodells bleibt jedoch unklar, weshalb die Analogie mit der Zweispurigkeit des Fahrzeugs beim Licht funktioniert.

⁷² Modelle zum Verlauf des Lichts durch Kreisscheiben bzw. Kugeln können auch helfen, optische Phänomene zu behandeln (z. B. bei Thema Regenbogen, siehe Kapitel 3.2.3).

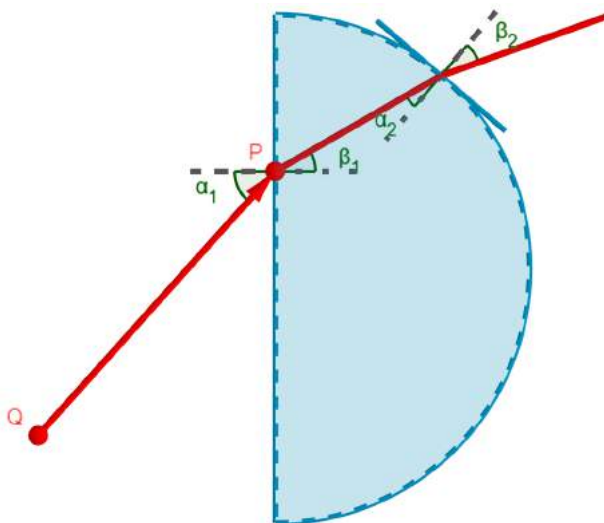


Abbildung 66: Dynamisches Modell zum Lichtweg durch eine Halbkreisscheibe

Winkelscheibe ab und tragen die Wertepaare in eine Tabelle ein. Hierbei lässt sich auch das Anfertigen und Ablesen von Diagrammen einüben.⁷³ Allerdings wird das Licht nicht nur beim Eintritt in die Halbkreisscheibe gebrochen, sondern auch beim Austritt, wenn die Mitte nicht getroffen wird (siehe Kapitel 4.2.2), so dass die Auseinandersetzung mit einem entsprechenden dynamischen Modell im Vorfeld der Messung empfohlen wird (siehe Abbildung 66). Mit einem Schieberegler wird der Punkt P an der flachen Seite der Halbkreisscheibe bei gleichbleibendem Einfallswinkel verschoben, bis die Stelle bestimmt wird, bei der das Licht nur beim Eintritt gebrochen wird.

Dynamische Winkelscheibe

Bei der Einstellung des Einfallswinkels und der Messung des Brechungswinkels arbeiten die Lernenden mit Winkelscheiben, die für gewöhnlich aus vier Abschnitten von 0° bis 90° bestehen. Um das richtige Ablesen des Winkels zu visualisieren, lässt sich eine dynamische Winkelscheibe einsetzen, bei der sowohl die Grenzfläche, an der die Messung durchgeführt wird, als auch das Lot beschriftet sind. Das einfallende Licht wird als Pfeil gezeichnet und der Winkel wird vom Lot aus gemessen (siehe Abbildung 67). Mit einem Schieberegler wird der Pfeil um die Winkelscheibe mit dem Radius r herum bewegt, aber der Winkel wird immer von 0° abgetragen. Zusätzlich wird für jeden eingestellten Winkel die senkrecht auf dem Lot stehende Gegenkathete visualisiert und ihre Länge h angegeben:

$$0 \leq h \leq 100 = r. \quad \{8\}$$

⁷³ Die einzelnen Messwerte können zu einer Kurve verbunden werden, an der auch für im Experiment nicht eingestellte Einfallswinkel die Brechungswinkel abgelesen werden können (Interpolation).

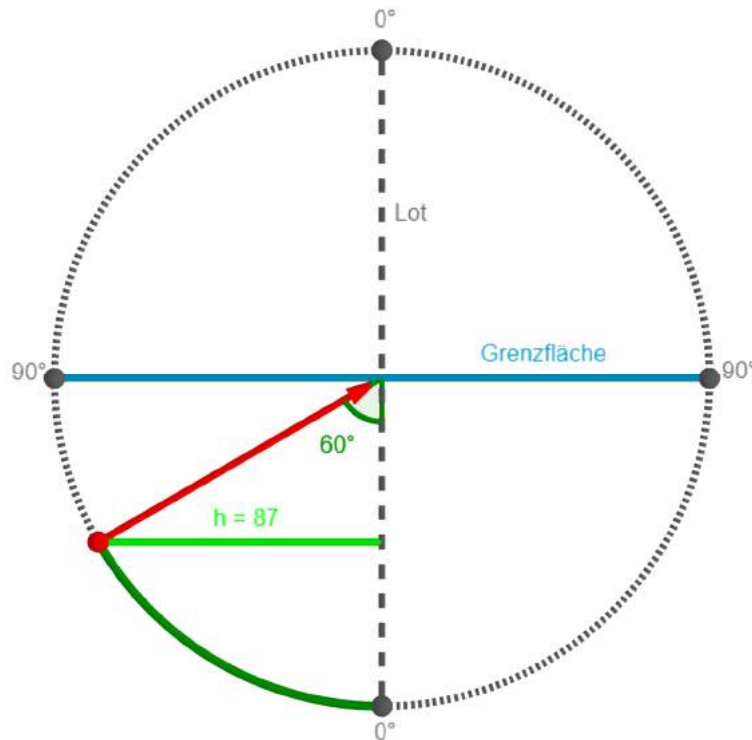


Abbildung 67: Dynamisches Modell einer Winkelscheibe

Als Ergebnis lässt sich das vereinfachte Brechungsgesetz in {6} durch die dynamische Umrechnung der gemessenen Winkel α und β in die Strecken h_1 und h_2 überprüfen.

Optische Hebung und Verschiebung

Neben der Einführung des Brechungsgesetzes in einer qualitativen oder auch quantitativen Form können im Optikunterricht viele auf der Brechung basierende optische Phänomene gezeigt und mit der Brechung erklärt werden. Zu diesem Thema gibt es einige Freihandexperimente (z. B. Berthold & Hilscher, 2018, S. 7) und ausgearbeitete Experimentiervorschläge (z. B. Wiesner, Engelhardt & Herdt, 2007; Winkelmann & Erb, 2014). Ein beliebtes Phänomen ist die scheinbar angehobene Position von Objekten, die sich im Wasser befinden. In geometrischen Modellen kann die optische Hebung nach demselben Prinzip beschrieben werden wie die Bildentstehung am Spiegel: Das Bild entsteht dort, wo sich die rückwärtigen Verlängerungen der vom Gegenstandspunkt ausgehenden und an der Grenzfläche gebrochenen Lichtwege schneiden. Allerdings gibt es hierbei zwei mögliche Orte für das Bild, die auf unterschiedliche Konstruktionen zurückzuführen sind: Das Bild ergibt sich jeweils durch die Betrachtung von zwei Lichtwegen,

5 Optik mit Modellen und Experimenten

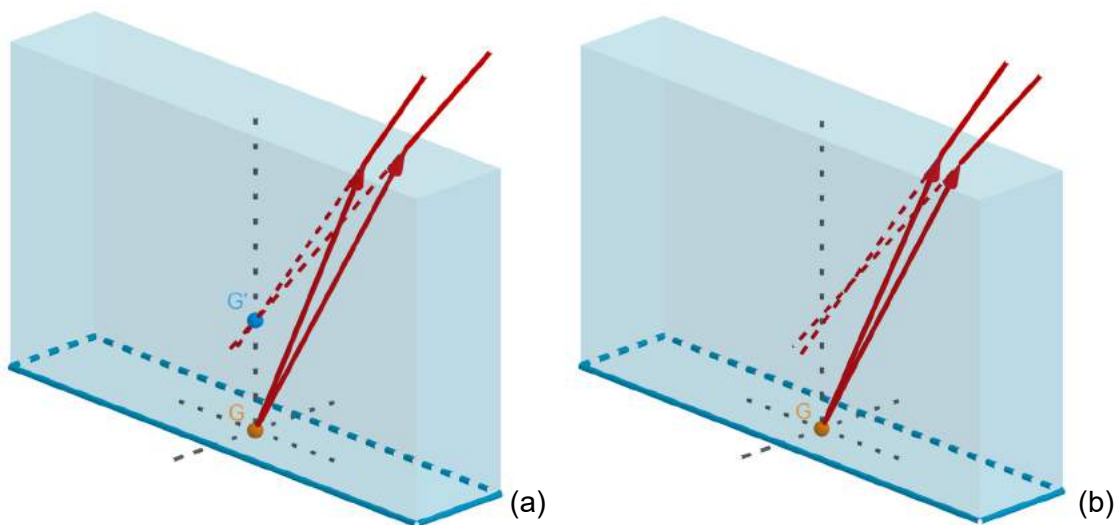
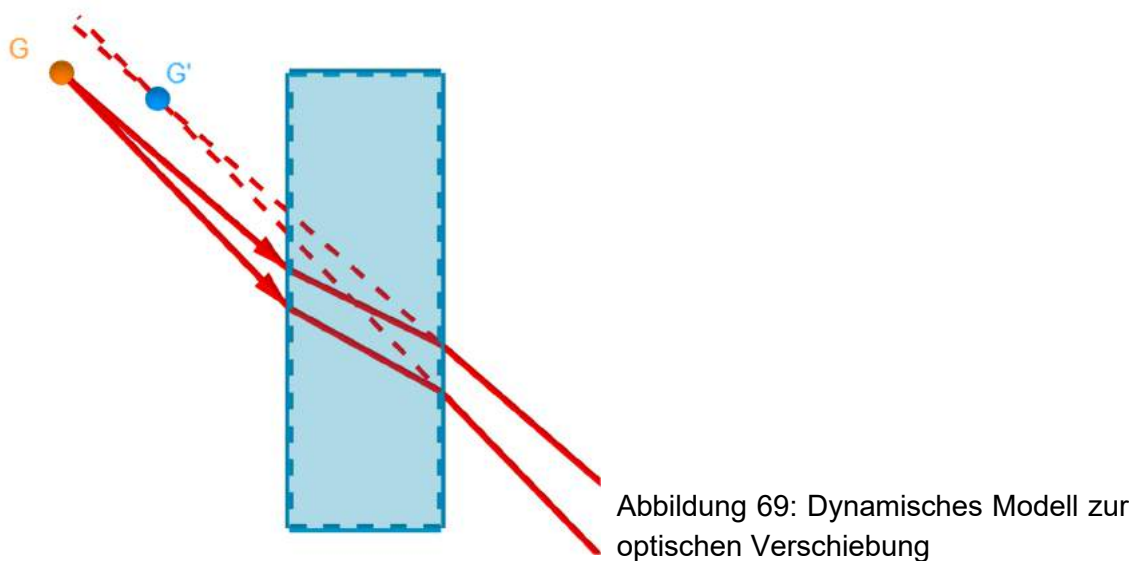


Abbildung 68: Dynamisches Modell zur optischen Hebung mit dem (a) sagittalen und (b) meridionalen Bild

die – vom Beobachter aus gesehen – (a) horizontal und (b) vertikal gegeneinander verschoben sind (siehe Abbildung 68). Ersteres wird als sagittales Bild bezeichnet und liegt oberhalb des Gegenstandspunktes. Letzteres heißt meridionales Bild und ist sowohl angehoben als auch zum Beobachter hin verschoben. Quick und Grebe-Ellis (2011) haben sich analytisch und experimentell mit der Frage befasst und kommen zu dem Schluss, dass sowohl im monokularen Fall als auch für ein horizontal zur Grenzfläche liegendes Augenpaar das sagittale Bild beobachtet wird.

Aus diesem Grund zeigt das dynamische Modell zur optischen Hebung standardmäßig die Konstruktion des sagittalen Bildes. Die Modellierung dieses Phänomens erfordert die Verwendung der 3D Grafik-Ansicht nicht nur aus den allgemeinen Gestaltungsempfehlungen heraus (siehe Abschnitt „Grafik“ in Kapitel 4.5.3), sondern auch wegen der spezifischen Anordnung der Lichtwege. Die in den schulüblichen Darstellungen verwendete Seitenansicht zeigt zwar ebenfalls die über den wahren Ort des Gegenstandes hinweg verlaufende Verlängerung des gebrochenen Lichtwegs an. Dass sich zwei Verlängerungen jedoch genau über dem Gegenstandspunkt kreuzen und er für das Auge lediglich angehoben erscheint, kann so nicht gezeigt werden. Mit einem Schieberegler wird die Stelle, an der das Licht aus dem optisch dichteren Medium austritt, verschoben. Das Modell deutet damit an, dass das Ausmaß der optischen Hebung davon abhängt, aus welcher Richtung in das Medium geblickt wird: Je flacher der Winkel ist, desto größer ist die sichtbare optische Hebung.



Um das Phänomen der optischen Hebung erfahrbar zu machen, bieten sich die bekannten Experimente mit einer Münze im Wasserbecken an. Damit die Konstruktion jedoch nicht nur eine abstrakte Erklärung bleibt, der die Lernenden vertrauen müssen, kann das dynamische Modell in einem AR-Experiment eingesetzt werden (siehe Abbildung 88 im Anhang). Die Münze liegt dort, wo sich im Modell der Gegenstandspunkt G befindet, was beim Blick von der Seite deutlich wird. Von oben entlang der Lichtwege betrachtet, erscheint sie am Ort von G' , also dort, wo sich die verlängerten Lichtwege kreuzen.

Wird ein Gegenstand schräg durch einen Glasblock betrachtet, lässt sich keine optische Hebung, sondern eine optische Verschiebung beobachten. Um die Position dieses Bildes mit einem Modell voraussagen, werden Lichtwege rückwärtig verlängert, die in der horizontalen gegeneinander verschoben sind (siehe Abbildung 69). Das Bild rückt dabei zur Seite und näher zum Beobachter. Wie bei der optischen Hebung lässt sich bei der optischen Verschiebung die Richtung, in die das Licht des Gegenstandes die Grenzfläche verlässt, mit einem Schieberegler beeinflussen. Es wird deutlich, dass im Gegensatz zum Spiegelbild die Position der durch Brechung entstehenden Bilder nicht für alle Beobachter gleich ist. Der Ort des verschobenen Bildes hängt davon ab, aus welcher Richtung das Bild gesehen wird, was auch mithilfe eines AR-Experiments gezeigt werden kann (siehe Abbildung 89 im Anhang).

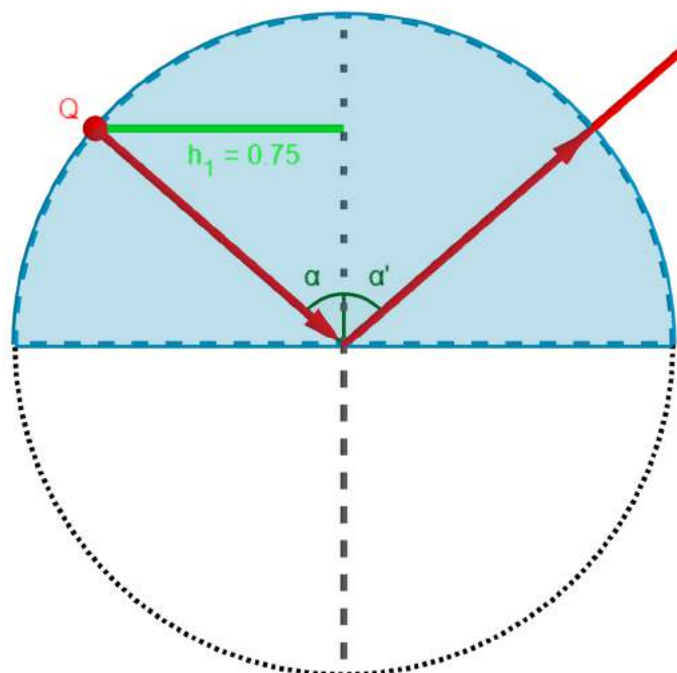


Abbildung 70: Dynamisches Modell zur Totalreflexion

Totalreflexion

In allen bisherigen Modellen zur Brechung wurde die Reflexion an den Grenzflächen optischer Medien nicht visualisiert, da sie zum einen bereits behandelt wurde und zum anderen sollten die Modelle nicht durch an dieser Stelle nebensächliche Elemente überladen werden. Diese Idealisierung kann insbesondere dann einen eigenen Lerninhalt darstellen, wenn in Modellen mit Übergängen von einem optisch dichteren Medium in ein optisch dünneres bei bestimmten Winkeln keine Brechung mehr beobachtet werden kann und in Experimenten stattdessen das reflektierte Licht besonders sichtbar wird. Diese Beobachtung kann als Anlass dienen, diesen Übergang gesondert zu untersuchen.

Das dynamische Modell zur Totalreflexion visualisiert sowohl den beim Übergang von einer Halbkreisscheibe zu Luft gebrochenen als auch den an der Grenzfläche reflektierten Lichtweg. Ab einem bestimmten Einfallswinkel, der mit einem Schieberegler variiert werden kann, erreicht der vom Lot weg gebrochene Lichtweg 90° . Das ist genau der Punkt, ab dem das Licht vollständig reflektiert wird (siehe Abbildung 70). Das auf dem vereinfachten Brechungsgesetz basierte Modell sagt eine Totalreflexion für den Übergang von einem optisch dichteren Medium zu Luft voraus ($n_2 = 1 < n_1$), sobald folgende Bedingung erfüllt ist:

$$h_2 = 1 \stackrel{\{6\}}{\Rightarrow} h_1 = \frac{1}{n_1}. \quad \{9\}$$

Für Wasser kann die Vorhersage

$$h_1 = \frac{1}{1,33} \cong 0,75 \quad \{10\}$$

mit einer befüllbaren Halbkreisscheibe und der dynamischen Winkelscheibe in Abbildung 67 experimentell überprüft werden.

5.2.4 Abbildungen an Linsen

Die Linse ist das nächste optische Bauteil, dessen bilderzeugende Eigenschaften im Rahmen des Konzepts behandelt werden.⁷⁴ Das Ziel der geometrischen Optik an dieser Stelle ist, plausible Konstruktionsregeln für Abbildungen aufzustellen, deren Gültigkeit zu diskutieren und sie an anderer Stelle anzuwenden. Die Zerstreuungslinse, Linsensysteme sowie optische Geräte wie Mikroskop oder Fernrohr können in Anschluss als Vertiefung behandelt werden. Die Grundlagen dafür werden mit den im Folgenden vorgestellten dynamischen Modellen zur Sammellinse gelegt. Als alltagsnahes Beispiel einer Sammellinse können ein mit Wasser gefülltes Weinglas oder eine Glaskugel zur Demonstration einer lokalen Aufhellung durch Fokussierung von Licht verwendet werden (Schusterkugel; Winkelmann, 2013). Als Anwendung dient der physikalische Teil des Sehvorgangs im Auge, sodass am Ende der geometrischen Optik auch Fehlsichtigkeit und Sehhilfen behandelt werden können.

Die zuvor behandelte Halbkreisscheibe weist bereits lichtfokussierende Eigenschaften auf, die während der Arbeit mit dem Modell oder beim Experimentieren thematisiert werden können. Sie werden zu Beginn des Themas aufgegriffen, um mithilfe von parallelem Licht den Brennpunkt einzuführen. Danach werden Lichtwege betrachtet, die von einem Punkt ausgehen und sich hinter einer Sammellinse wieder kreuzen. Die Aussagen dieses Modells werden genutzt, um einfache Konstruktionsregeln aufzustellen, die für das Verhalten des Lichts an dünnen Linsen gelten. Das mit diesen Regeln konstruierte Modell wird schließlich genutzt, um die Eigenschaften von Linsenabbildungen zu erkunden und sie in Experimenten zu überprüfen.

⁷⁴ Die Bildentstehung an sphärischen Spiegeln stellt ebenfalls ein mögliches Unterrichtsthema dar. Es gelten jedoch ähnliche Konstruktionsregeln wie für Linsen, sodass sich sphärische Spiegel zusammen mit anderen optischen Geräten als Themen zur Vertiefung anbieten.

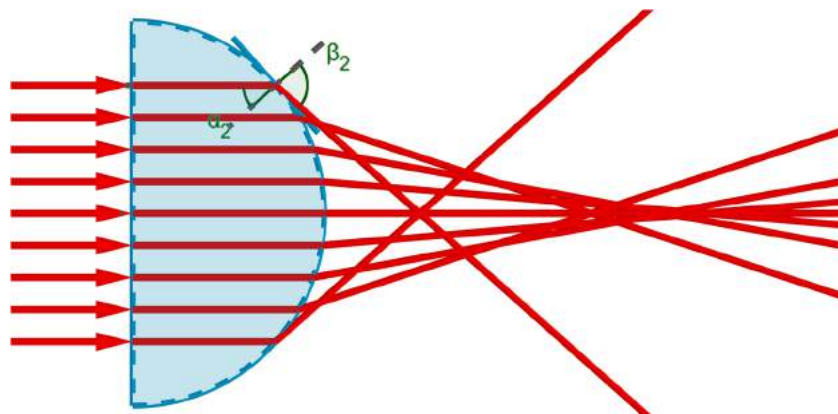


Abbildung 71: Dynamisches Modell zur Brechung an gekrümmten Flächen

Brechung an gekrümmten Flächen

Um zu zeigen, wie paralleles Licht an gekrümmten Flächen gebrochen wird, wurde das Modell zum Lichtweg durch eine Halbkreisscheibe angepasst. Der Einfallswinkel ist auf 0° eingestellt, sodass das Licht nur beim Austritt gebrochen wird. Mit einem Schieberegler wird wie zuvor die Eintrittsstelle verschoben, allerdings hinterlassen die Lichtwege Spuren.⁷⁵ Auf diese Weise wird nicht nur ein Lichtweg angezeigt, sondern mehrere, die in gleichmäßigen Abständen auf die Halbkreisscheibe treffen (siehe Abbildung 71). Die Lichtwege kreuzen die optische Achse, wobei das Licht im äußeren Bereich – wo die Krümmung am größten ist – stärker zur Mitte hin gebrochen wird als das Licht, das eher durch die Mitte geht. Als Ergebnis wird deutlich, dass eine gekrümmte Fläche paralleles Licht auf der optischen Achse bündelt. Das meiste Licht trifft sich in einem Brennpunkt in einer gewissen Entfernung hinter der Linse, während ein kleinerer Teil weiter vorne zusammenläuft.

An dieser Stelle gilt es nochmal zu verdeutlichen, dass die Visualisierung einzelner Lichtwege nur ein Werkzeug der Erkenntnisgewinnung ist und sich auch zwischen den eingezeichneten Pfeilen, Strecken und Strahlen Licht ausbreitet. Im Experiment wird dazu mit einer Experimentierleuchte ein breites paralleles Lichtbündel durch eine Halbkreisscheibe geschickt. Es läuft auf der optischen Achse

⁷⁵ Für jedes Objekt in *GeoGebra* kann die Eigenschaft *Spur anzeigen* aktiviert werden, sodass es beim Verschieben einen Abdruck hinterlässt. Damit nicht der gesamte Weg durchgehend mit Spuren überzogen wird, wird für den entsprechenden Schieberegler eine größere Schrittweite eingestellt. Außerdem befindet sich neben dem Schieberegler eine Taste zum Löschen der Spuren.

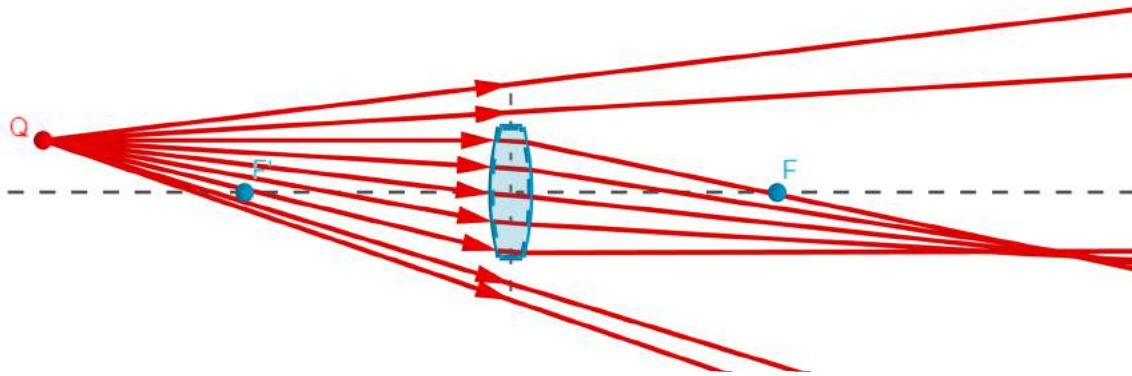


Abbildung 72: Dynamisches Modell zur Brechung an einer Sammellinse

ungefähr so zusammen, wie es das Modell voraussagt, wobei das reale Phänomen und die Vorhersage mithilfe von AR verglichen werden können (siehe Abbildung 90 im Anhang).

Brechung an einer Sammellinse

Sammellinsen können unterschiedlich geformt sein, solange eine Seite stärker nach außen gewölbt ist als die andere. Eindeutig als Sammellinse zu erkennen sind Linsen, die auf beiden Seiten eine im Querschnitt kreisförmige Krümmung nach außen aufweisen, sodass diese Form für das dynamische Modell verwendet wurde. Allerdings fehlen die obere und untere Spitze der Linse, da gerade diese Bereiche das Licht an eine andere Stelle lenken. Im Modell wird das Licht einer Punktlichtquelle Q betrachtet, das in verschiedene Richtungen abgestrahlt wird. Der voreingestellte Lichtweg verläuft parallel zur optischen Achse und wird sowohl beim Ein- als auch beim Austritt aus der Linse gebrochen. Es ist zu erkennen, dass er hinter der Linse durch den eingezeichneten Brennpunkt F verläuft. Die Richtung des konstruierten Lichtwegs wird mit einem Schieberegler verändert, wobei wie im Modell zuvor Spuren der Lichtwege hinterlassen werden. Alle durch die Linse verlaufenden Lichtwege kreuzen sich in einem nahezu punktförmigen Bereich (siehe Abbildung 72). Werden die Spuren zwischendurch mit der Taste neben dem Schieberegler gelöscht, lässt sich auch das Verhalten einzelner, *ausgezeichneter Lichtwege* untersuchen: Wie zu Beginn verdeutlicht, wird parallel einfallendes Licht so gebrochen, dass es die optische Achse im Brennpunkt F schneidet. Umgekehrt verlässt Licht, das aus dem Brennpunkt F' vor der Linse kommt, die Linse parallel zur optischen Achse. Das Licht, das in Richtung des Mittelpunktes der Linse einfällt, durchdringt die Linse nahezu ungebrochen. Diese Konstruktionsregeln werden in das nächste Modell übertragen.

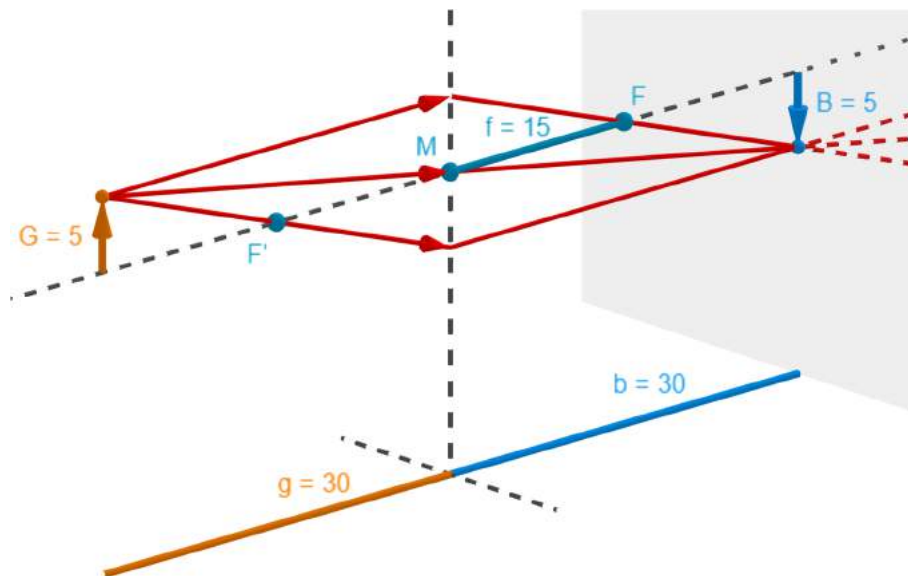


Abbildung 73: Dynamisches Modell zur Abbildung an einer Sammellinse (reelles Bild)

Wenn Licht an einer bestimmten Stelle gesammelt wird, dann fehlt es an anderer Stelle, sodass Schatten entstehen muss. Das wird im Modell dadurch verdeutlicht, dass auch Lichtwege visualisiert werden, die oberhalb und unterhalb der Linse verlaufen. Zwischen ihnen und dem zusammenlaufenden Lichtbündel müsste es dunkel sein. Eine Experimentierleuchte ohne Linse bildet eine nahezu punktförmige Lichtquelle. Ihr Licht wird im Experiment durch eine Sammellinse derselben Form geschickt wie im Modell, sodass sowohl das gesammelte Licht als auch der Schatten hinter der Linse zu sehen sind. Abstrakte Lichtwege, mit denen die geometrische Optik arbeitet, können auch an diesem Aufbau mithilfe von AR zusammen mit dem realen Phänomen gezeigt werden (siehe Abbildung 91 im Anhang).

Abbildung an einer Sammellinse

Die Konstruktionsregeln für ausgezeichnete Lichtwege lassen sich verwenden, um Abbildungen an Sammellinsen und anderen optischen Systemen zu konstruieren. Sie erlauben, die Brechung an den Linsenoberflächen nicht mehr einzeln mit dem Brechungsgesetz bestimmen zu müssen. Im folgenden Modell werden statt der Linse ihr Mittelpunkt, die Brennweite f und die zugehörigen Brennpunkte F und F' gezeichnet, um mit den drei ausgezeichneten Lichtwegen eine optische Abbildung zu konstruieren (siehe Abbildung 73). Die Gestaltung des Modells ist an das zur Lochkamera angelehnt (siehe Kapitel 5.2.1). Die Lichtwege verlaufen

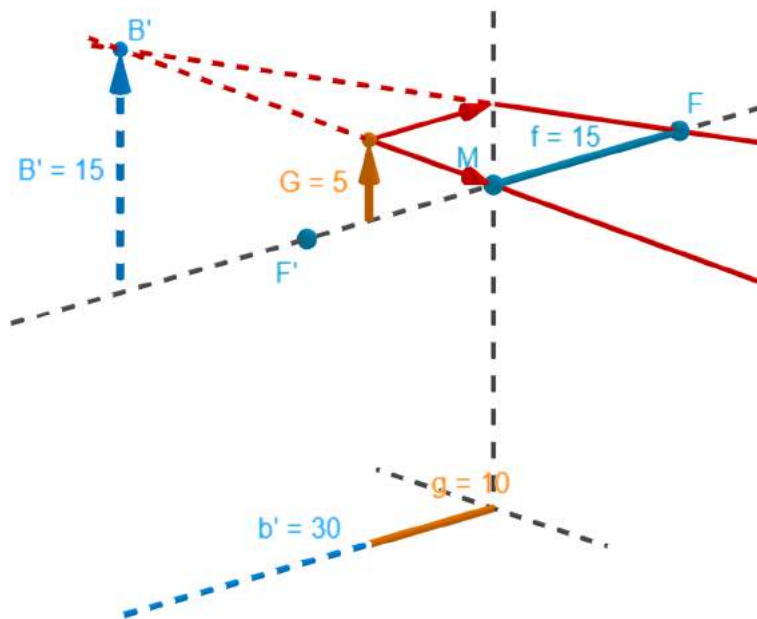


Abbildung 74: Dynamisches Modell zur Abbildung an einer Sammellinse (virtuelles Bild)

nicht mehr in der xy -Ebene, sondern senkrecht dazu. Abgebildet wird der Gegenstandspunkt an der Spitze eines Pfeils mit der Gegenstandsgröße G auf der optischen Achse. Seine Position wird durch die Gegenstandsweite g bestimmt. Die Lichtwege kreuzen sich hinter der Linse im Bildpunkt an der Spitze eines Pfeils auf einem Schirm. Da der Pfeil auf dem Schirm nach unten zeigt, deutet das Modell an, dass das reelle Bild wie zuvor bei der Abbildung an einer Lochblende auf dem Kopf steht und seitenverkehrt ist. Mit einem Schieberegler wird die Gegenstandsweite verändert, sodass sich sowohl die Bildweite b als auch die Bildgröße B dynamisch anpassen: Je kleiner die Gegenstandsweite ist, desto größer und weiter weg ist das Bild. Das Modell gibt damit, was die Bildweite angeht, den Zusammenhang wieder, der in der *Linsegleichung*

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b} \quad \{11\}$$

gegeben ist: Wenn bei gegebener Brennweite ein Summand größer wird (kleinere Gegenstandsweite), dann wird der andere kleiner (größere Bildweite).

Sobald die Gegenstandsweite kleiner ist als die Brennweite, verschwindet das Bild auf der Bildseite und taucht auf der Gegenstandsseite auf (siehe Abbildung 74). Es entsteht aus den rückwärtigen Verlängerungen, die wie zuvor beim Spie-

5 Optik mit Modellen und Experimenten

gelbild gestrichelt gezeichnet werden (siehe Abschnitt „Spiegelbild“ in Kapitel 5.1.3). Sie deuten damit das vergrößerte Bild an, das mit dem Auge gesehen werden kann, wenn die Sammellinse als Lupe verwendet wird.

Zur Demonstration einer optischen Abbildung an einer Sammellinse wird im Experiment ein leuchtender Buchstabe L als Gegenstand verwendet. Er kann mithilfe eines entsprechenden Dias und einer Experimentierleuchte auf einer optischen Bank erzeugt werden. Die Sammellinse bildet den Buchstaben scharf auf einem Schirm ab, sobald der Schirm an die richtige Stelle geschoben wird. Welche Stelle das ist, kann aus dem dynamischen Modell abgeleitet werden, sobald alle Parameter des Experiments im Modell eingestellt wurden. Es steht – wie im Modell gezeigt – auf dem Kopf und ist seitenverkehrt. Darüber hinaus kann das Modell mithilfe von AR direkt in den Aufbau eingeblendet werden, sodass der modellierte Bildpfeil neben dem Bild auf dem realen Schirm betrachtet werden können (siehe Abbildung 92 im Anhang). Die Größe beider Bilder stimmt ungefähr überein, was dafür spricht, dass die drei ausgezeichneten Lichtwege die physikalischen Eigenschaften optischer Abbildungen beschreiben. Selbst die Entstehung des vergrößerten virtuellen Bildes, das durch die Sammellinse als Lupe von dem Buchstaben gesehen werden kann, lässt sich in AR überprüfen (siehe Abbildung 93 im Anhang).

So haben wir die Aufgabe der Wissenschaft neu definiert: Es geht um die Entdeckung von Gesetzen, die es uns ermöglichen, Ereignisse innerhalb der Grenzen vorherzusagen, die uns die Unschärferelation setzt. (S. 235)

Hawking (2018)

6 Ausblick

Erkenntnistheoretische Überlegungen zum Modellbegriff und ihre Übertragung auf den Erkenntnisprozess im Physikunterricht bildeten den Ausgangspunkt dieser Arbeit. Mit der physikalischen Modellbildung wurde ein didaktisches Konzept formuliert, das die vier Stationen der Erkenntnisgewinnung Phänomen, Modell, Hypothese und Experiment als Lernprodukte voneinander abgrenzt. Damit wird eine Unterrichtsstruktur vorgeschlagen, die sich an dem wissenschaftlichen Denken orientiert. Sie soll Lernenden ermöglichen, die zur angemessenen Erschließung neuer Fachinhalte notwendigen Lernschritte zu gehen. Des Weiteren wurde geprüft, inwiefern sich der Einsatz der DGS *GeoGebra* eignet, dynamische Modelle für den Optikunterricht zu erstellen und als Lernmedien im Rahmen dieses Konzepts anzubieten. Als Visualisierungen unterstützen sie Lernende einerseits beim Aufbau wissenschaftlicher Vorstellungen bezüglich physikalischer Phänomene. Andererseits ermöglichen sie als Simulationen dynamische Veränderungen im Modell, deren Beobachtung die Grundlage für die Formulierung von Hypothesen bildet. Im Unterricht können dynamische Modelle die Lücke im Erkenntnisprozess zwischen einer physikalischen Fragestellung und einer im Experiment überprüfbareren Hypothese schließen.

Das Konzept wurde zunächst auf die Ausbildung von Lehrkräften angewandt, indem im Vorfeld eines Versuchstages im physikalischen Praktikum der Optik eine verpflichtende Auseinandersetzung mit dynamischen Modellen als Vorbereitung auf die üblichen Experimente zum Thema Lichtbrechung eingeführt wurde. Die Ergebnisse der begleitenden Untersuchung im Mixed-Methods-Design haben einen tiefen Einblick gegeben, wie Studierende mit dem angebotenen Lernmedium umgehen und welche Verhaltensmuster zu erwarten sind. Genauso sind die abgeleiteten Gestaltungsempfehlungen für die Entwicklung und den weiteren Einsatz von dynamischen Modellen innerhalb der physikalischen Modellbildung relevant. Die Erkenntnisse werden u. a. im Nachfolgeprojekt *Wirkungsvolle AR im Praktikum der Physik* (WARP-P) im Rahmen des *Digital Teaching and Learning*

Lab (DigiTeLL) verwendet, um Studierenden digitale Lernumgebungen mit dynamischen Modellen zur Unterstützung des Experimentierens anbieten zu können (Goethe-Universität Frankfurt, 2022). Darüber hinaus werden die Modelle in AR-Experimenten eingesetzt.

Im vorhergehenden Kapitel wurden aufeinander aufbauende dynamische Modelle zu einem Unterrichtskonzept für den Optikunterricht der Sekundarstufe I zusammengestellt. Eine Umsetzung des gesamten Konzepts in Form einer Unterrichtseinheit steht zwar noch aus, aber einzelne Bestandteile wurden in verschiedenen Lehr-Lernsituationen erprobt. Einige Themen, Modellideen und Experimente, die in das Kapitel 5.1 zur Anfangsoptik eingeflossen sind, wurden zuvor als Online-Lernkurs für Lernende verschiedener Schulstufen im pandemiebedingten Homeschooling bzw. Distanzunterricht angeboten. Die Durchführung der geplanten Experimente wurde dafür schrittweise fotografiert und mit verschiedenen Steuerungsmöglichkeiten als IBE aufgearbeitet. In der begleitenden Untersuchung wurde u. a. der Frage nachgegangen, in welchem Ausmaß die jeweilige Auseinandersetzung mit einem Modell und einem Experiment zum physikalischen Verständnis eines Phänomens beiträgt. Um diesen Lernprozess abzubilden, wurden die Lernenden zu jedem Phänomen zu drei Messzeitpunkten getestet: Nach der Fragestellung, nach dem Modell und nach dem Experiment. Das durchschnittliche Testergebnis war zum ersten Messzeitpunkt erwartungsgemäß am niedrigsten, nahm jedoch nach der Arbeit mit dem Modell zunächst deutlich und nach dem Experiment geringfügig zu (Teichrew & Erb, 2021b). Es bleibt noch zu klären, ob die im Kreislauf der Erkenntnisgewinnung angelegte Reihenfolge der Lernmedien einen Effekt auf den Lernprozess hat.

Die in dieser Arbeit entwickelten und eingesetzten dynamischen Modelle konzentrieren sich auf die Optik als primäres Anwendungsgebiet. Allerdings wurden bereits Versuche unternommen, andere Gebiete der Physik im Rahmen der physikalischen Modellbildung aufzuarbeiten. So wurden an unterschiedlichen Spielplatzgeräten Phänomene identifiziert, die sich als Grundlage für dynamische Modelle und AR-Experimente eignen. Im Rahmen einer wissenschaftlichen Hausarbeit wurden daraufhin Modelle und Lernaktivitäten zur Durchführung auf dem Spielplatz entwickelt und erprobt, die ein vertieftes Verständnis der Spielplatzgeräte und der jeweils zugrundeliegenden physikalischen Konzepte fördern. Eine Rutsche wird beispielsweise als schiefe Ebene betrachtet, an der die Zusammensetzung der Hangabtriebskraft gezeigt wird, und an einer Wippe werden im AR-Experiment die Bedingungen für den Gleichgewichtszustand eines Hebels

untersucht. Die Lernverläufe wurden jeweils mit zwei Gruppen zu je drei Lernenden der 10. Klasse eines Frankfurter Gymnasiums anhand von Tonaufnahmen während der Arbeit mit dem dynamischen Modell und der Durchführung des AR-Experiments analysiert. Es konnte gezeigt werden, dass die Lernenden ihre fachlichen Konzepte bezüglich der Problemstellungen am Spielplatz mithilfe der dynamischen Modelle und auch während der Überlagerung in AR ausgebaut haben. In Anschlussgesprächen haben die Lernenden im Vergleich zum herkömmlichen Unterricht vor allem die Möglichkeit hervorgehoben, Fachinhalte mithilfe von AR auf die Realität zu übertragen (Weber & Teichrew, 2021).

Parallel zur Forschung erfolgte eine stetige Entwicklungsarbeit, um Lehrkräften dynamische Modelle und AR-Experimente in verschiedenen inhaltlichen Kontexten anbieten zu können. Im Rahmen des Projekts *Digitale Kompetenz beim Modellieren und Experimentieren im Physikunterricht* (diMEx) wurde eine mehrteilige Lehrkräftefortbildung zu AR-Experimenten im Physikunterricht geplant und durchgeführt (Freese, Winkelmann, Teichrew & Ullrich, 2020). Die teilnehmenden Lehrkräfte haben das Konzept der physikalischen Modellbildung kennengelernt, Materialien bekommen und teilweise eigene Modelle für ihre Experimente gestaltet sowie im Unterricht eingesetzt. Die Materialien und Übungen aus der Fortbildung werden interessierten Lehrkräften zur Weiterbildung im Selbststudium als OER zur Verfügung gestellt. Sie sind somit für den weiteren Einsatz oder zur Weiterentwicklung frei verfügbar, was den Transfer der physikalischen Modellbildung mit dynamischen Modellen in die Unterrichtspraxis ermöglicht.

Literaturverzeichnis

- Abrahams, I. & Millar, R. (2008). Does Practical Work Really Work? A study of the effectiveness of practical work as a teaching and learning method in school science. *International Journal of Science Education*, 30(14), 1945–1969. <https://doi.org/10.1080/09500690701749305>
- Ainsworth, S. (2006). DeFT: A conceptual framework for considering learning with multiple representations. *Learning and Instruction*, 16(3), 183–198. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2006.03.001>
- Akerson, V. L., Buck, G. A., Donnelly, L. A., Nargund-Joshi, V. & Weiland, I. S. (2011). The Importance of Teaching and Learning Nature of Science in the Early Childhood Years. *Journal of Science Education and Technology*, 20(5), 537–549. <https://doi.org/10.1007/s10956-011-9312-5>
- Aronson, J., Zimmerman, J. & Carlos, L. (1998). Improving Student Achievement by Extending School: Is It Just a Matter of Time? WestEd. Zugriff am 26.12.2021. Verfügbar unter: https://www2.wested.org/www-static/online_pubs/po-98-02.pdf
- Azuma, R., Bailiot, Y., Behringer, R., Feiner, S., Julier, S. & MacIntyre, B. (2001). Recent advances in augmented reality. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 21(6), 34–47.
- Bailer-Jones, D. M. (2009). *Scientific Models in Philosophy of Science*. University of Pittsburgh Press. Zugriff am 1.2.2021. Verfügbar unter: <http://ebookcentral.proquest.com/lib/senc/detail.action?docID=2038163>
- Bandura, A. (1977). Self-efficacy: Toward a unifying theory of behavioral change. *Psychological Review*, 84(2), 191. US: American Psychological Association. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.84.2.191>
- Bandura, A. (1997). *Self-efficacy: The exercise of control*. New York: W. H. Freeman.
- Bartle, R. A. (2004). *Designing virtual worlds*. Indianapolis: New Riders.
- Bauer, C. A. (2011). *User Generated Content: Urheberrechtliche Zulässigkeit nutzergenerierter Medieninhalte*. Berlin, Heidelberg: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-20068-7>
- Bender, P. (1989). Anschauliches Beweisen im Geometrieunterricht unter besonderer Berücksichtigung von (stetigen) Bewegungen bzw. Verformungen (Schriftenreihe Didaktik der Mathematik). In H. Kautschitsch & W. Metzler (Hrsg.), *Anschauliches Beweisen* (Band 18, S. 95–145). Wien: Hölder-Pichler-Tempsky & Stuttgart: Teubner. Zugriff am 5.6.2021. Verfügbar unter: <http://digital.ub.uni-paderborn.de/hsx/42237>
- Berthold, C. & Hilscher, H. (Hrsg.). (2018). *Physikalische Freihandexperimente Band 2* (5. Auflage.). Seelze: Aulis Verlag [in Friedrich Verlag GmbH].
- Bescherer, C. (2004). *Selbsteinschätzung mathematischer Studierfähigkeit bei Studienanfängerinnen und -anfängern. Empirische Untersuchung und*

Literaturverzeichnis

- praktische Konsequenz*. PhD Thesis. Verfügbar unter: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:93-opus-16269>
- Blanca, M. J., Alarcón, R. & Arnau, J. (2017). Non-normal data: Is ANOVA still a valid option? *Psicothema*, (29.4), 552–557.
<https://doi.org/10.7334/psicothema2016.383>
- Blanz, M. (2021). *Forschungsmethoden und Statistik für die Soziale Arbeit: Grundlagen und Anwendungen* (2. Auflage.). Stuttgart: Verlag W. Kohlhammer.
- Bloxham, J. (2014). Augmented Reality Learning. *ITNOW*, 56(3), 44–45. Oxford Academic.
- Blum, W. (2010). Modellierungsaufgaben im Mathematikunterricht: Herausforderung für Schüler und Lehrer. *Praxis der Mathematik in der Schule*.
- Blum, W. & Leiß, D. (2005). Modellieren im Unterricht mit der „Tanken“-Aufgabe. *Mathematik lehren*, 128, 18–21.
- Bogen, J. & Woodward, J. (1988). Saving the Phenomena. *The Philosophical Review*, 97(3), 303–352. [Duke University Press, Philosophical Review].
<https://doi.org/10.2307/2185445>
- Bortz, J. & Schuster, C. (2010). Stichprobe und Grundgesamtheit (Springer-Lehrbuch). In J. Bortz & C. Schuster (Hrsg.), *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler* (S. 79–95). Berlin, Heidelberg: Springer.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-12770-0_6
- Bossel, H. (1989). *Simulation dynamischer Systeme: Grundwissen, Methoden, Programme*. Braunschweig: Vieweg.
- Bruner, J. S. (1974). *Entwurf einer Unterrichtstheorie*. Berlin: Berlin-Verl.
- Budin, G. (1996). *Wissensorganisation und Terminologie: die Komplexität und Dynamik wissenschaftlicher Informations- und Kommunikationsprozesse*. Gunter Narr Verlag.
- Bungartz, H.-J., Zimmer, S., Buchholz, M. & Pflügler, D. (2009). *Modellbildung und Simulation* (eXamen.press). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
<https://doi.org/10.1007/978-3-540-79810-1>
- Butcher, N. & Moore, A. (2015). *Understanding Open Educational Resources*. Commonwealth of Learning (COL). Verfügbar unter:
https://www.oerknowledgecloud.org/archive/2015_Butcher_Moore_Understanding-OER.pdf
- Carmigniani, J. & Furht, B. (2011). Augmented Reality: An Overview. In B. Furht (Hrsg.), *Handbook of Augmented Reality*. New York, NY: Springer New York.
- Cleff, T. (2015a). Faktorenanalyse. *Deskriptive Statistik und Explorative Datenanalyse* (S. 217–234). Wiesbaden: Gabler Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-8349-4748-2_8

- Cleff, T. (2015b). Bivariate Zusammenhänge. *Deskriptive Statistik und Explorative Datenanalyse* (S. 73–133). Wiesbaden: Gabler Verlag.
https://doi.org/10.1007/978-3-8349-4748-2_8
- Cleff, T. (2015c). Clusteranalyse. *Deskriptive Statistik und Explorative Datenanalyse* (S. 189–215). Wiesbaden: Gabler Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-8349-4748-2_7
- Cohen, J. (1960). A Coefficient of Agreement for Nominal Scales. *Educational and Psychological Measurement*, 20(1), 37–46. SAGE Publications Inc.
<https://doi.org/10.1177/001316446002000104>
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2. Auflage). Hillsdale, N.J.: L. Erlbaum Associates.
- Concord Consortium. (2020). SageModeler – Systems Modeling Tool. Concord, MA: The Concord Consortium and the CREATE for STEM Institute at Michigan State University. Zugriff am 25.9.2022. Verfügbar unter:
<https://sagemodeler.concord.org/>
- Creswell, J. W. (2015). *A concise introduction to mixed methods research*. Los Angeles: SAGE.
- Cronbach, L. J. (1951). Coefficient alpha and the internal structure of tests. *Psychometrika*, 16(3), 297–334. <https://doi.org/10.1007/BF02310555>
- CSDT. (n. d.). Intrinsic Motivation Inventory (IMI). *Center for Self-Determination Theory*. Zugriff am 25.9.2022. Verfügbar unter:
<https://selfdeterminationtheory.org/intrinsic-motivation-inventory/>
- Deci, E. L. & Ryan, R. M. (1985). *Intrinsic Motivation and Self-Determination in Human Behavior*. New York: Springer. Zugriff am 3.1.2022. Verfügbar unter:
<http://ebookcentral.proquest.com/lib/senc/detail.action?docID=3086782>
- 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. Routledge. https://doi.org/10.1207/S15327965PLI1104_01
- Dehmel, S. (2013). Bring Your Own Device. (BITKOM, Hrsg.). BITKOM. Zugriff am 20.6.2021. Verfügbar unter:
<https://www.bitkom.org/sites/default/files/file/import/130304-LF-BYOD.pdf>
- Deutsches Wörterbuch von Jacob und Wilhelm Grimm*. (1854). (Bände 1-16, Band 12). Leipzig. Zugriff am 31.5.2020. Verfügbar unter:
<http://www.woerterbuchnetz.de/DWB?bookref=12,2439,72>
- Dutke, S. (1994). *Mentale Modelle: Konstrukte des Wissens und Verstehens: kognitionspsychologische Grundlagen für die Software-Ergonomie* (Arbeit und Technik). Göttingen: Verlag für Angewandte Psychologie.
- Epple, M. (2016). „Analogien“, „Interpretationen“, „Bilder“, „Systeme“ und „Modelle“: Bemerkungen zur Geschichte abstrakter Repräsentationen in den

Literaturverzeichnis

- Naturwissenschaften seit dem 19. Jahrhundert. *Forum Interdisziplinäre Begriffsgeschichte*, 5(1), 11–30.
- Erb, R. (1992). Geometrische Optik mit dem Fermat-Prinzip. *Physik in der Schule*, 30(9), 291–295.
- Erb, R. (1994). *Optik mit Lichtwegen: Das Fermat-Prinzip als Grundlage für das Verstehen der Optik*. Bochum: Westarp-Wissenschaften.
- Erb, R. (2008). Helligkeit des Regenbogens. *MNU*, 61(7), 413–418.
- Erb, R. (2017). *Optik mit GeoGebra*. Berlin: De Gruyter.
<https://doi.org/10.1515/9783110491340>
- Erb, R. & Teichrew, A. (2020). Geometrische Optik mit GeoGebra. *NiU Physik*, 31(175), 24–28.
- Erb, R., Wilhelm, T. & Kuhn, J. (2015). Relativitätstheorie mit GeoGebra. *Physik in unserer Zeit*, 46(3), 151–152. <https://doi.org/10.1002/piuz.201590050>
- Fischer, Hans Ernst & Krabbe, H. (2020). Empirische Forschung in der Physikdidaktik. In E. Kircher, R. Girwidz & Hans E. Fischer (Hrsg.), *Physikdidaktik | Methoden und Inhalte* (S. 1–35). Berlin, Heidelberg: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-59496-4_1
- Forrester, J. W. (2007). System dynamics—a personal view of the first fifty years. *System Dynamics Review*, 23(2–3), 345–358.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1002/sdr.382>
- Freese, M., Winkelmann, J., Teichrew, A. & Ullrich, M. (2020). Digitale Kompetenz beim Modellieren und Experimentieren im Physikunterricht. *PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*. Verfügbar unter:
<http://phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/1033>
- Frigg, R. & Hartmann, S. (2020). Models in Science. In E.N. Zalta (Hrsg.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Spring 2020.). Metaphysics Research Lab, Stanford University. Zugriff am 29.1.2021. Verfügbar unter:
<https://plato.stanford.edu/archives/spr2020/entries/models-science/>
- Fruböse, C. (2010). Der ungeliebte Physikunterricht: Ein Blick in die Fachliteratur und einige Anmerkungen aus der Praxis. *MNU*, 63(7), 388–392.
- Garzón, J. & Acevedo, J. (2019). Meta-analysis of the impact of Augmented Reality on students' learning gains. *Educational Research Review*, 27, 244–260.
<https://doi.org/10.1016/j.edurev.2019.04.001>
- Garzón, J., Kinshuk, Baldiris, S., Gutiérrez, J. & Pavón, J. (2020). How do pedagogical approaches affect the impact of augmented reality on education? A meta-analysis and research synthesis. *Educational Research Review*, 31, 100334.
<https://doi.org/10.1016/j.edurev.2020.100334>
- Gehlen, C. (2016). *Kompetenzstruktur naturwissenschaftlicher Erkenntnisgewinnung im Fach Chemie* (Studien zum Physik- und Chemielernen). Berlin: Logos Verlag.

- GeoGebra License. (2021). *GeoGebra*. Zugriff am 15.6.2021. Verfügbar unter: <https://www.geogebra.org/license>
- GeoGebra Team German. (2021). Lerne GeoGebra Classroom. *GeoGebra*. Zugriff am 1.11.2021. Verfügbar unter: <https://www.geogebra.org/m/vexj65n9#material/yujdt3rt>
- GeoGebra Team & Hohenwarter, M. (2021). GeoGebra joins BYJU'S Family – GeoGebra. *GeoGebra*. Zugriff am 25.10.2022. Verfügbar unter: <https://www.geogebra.org/m/fzkjvuuv>
- Giere, R. N. (2004). How Models Are Used to Represent Reality. *Philosophy of Science*, 71(5), 742–752. <https://doi.org/10.1086/425063>
- Giere, R. N., Bickle, J. & Mauldin, R. F. (2006). *Understanding scientific reasoning* (5th ed.). Belmont, CA: Wadsworth.
- Girwidz, R. (1998). Wellenlehre auf dem Computer. In W.B. Schneider & Arbeitskreis Bayerischer Physikdidaktiker (Hrsg.), *Wege in der Physikdidaktik, Bd. 4* (S. 278–289). Erlangen und Jena: Palm & Enke. Zugriff am 24.4.2021. Verfügbar unter: https://www.solstice.de/cms/upload/wege/band4/Wegeband_4/24-278-290/Girwidz.pdf
- Girwidz, R. (2013). Lernen mit bewegten Bildern: Animationen und dynamische Visualisierungen im Physikunterricht. *NiU Physik*, 24(137), 4–9.
- Girwidz, R. (2020a). Multimedia und digitale Medien im Physikunterricht. In E. Kircher, R. Girwidz & H.E. Fischer (Hrsg.), *Physikdidaktik | Grundlagen* (S. 457–527). Berlin, Heidelberg: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-59490-2>
- Girwidz, R. (2020b). Simulating waves and macroscopic phonons. *European Journal of Physics*, 42(1), 015801. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1361-6404/abc329>
- Girwidz, R. (n. d.). Programm „Medium2D“. *Lehrstuhl für Didaktik der Physik - LMU München*. Zugriff am 25.9.2022. Verfügbar unter: https://www.didaktik.physik.uni-muenchen.de/multimedia/programme_applets/wellen/medium2d/
- Glatz, L. C., Erb, R. & Teichrow, A. (2021). Studierende erstellen interaktive Experimentiervideos. In M. Kubsch, S. Sorge, J. Arnold & N. Graulich (Hrsg.), *Lehrkräftebildung neu gedacht: Ein Praxishandbuch für die Lehre in den Naturwissenschaften und deren Didaktiken* (S. 223–227). Münster: Waxmann Verlag GmbH. Zugriff am 11.6.2021. Verfügbar unter: <https://www.waxmann.com/index.php?eID=download&buchnr=4349#page=223>
- Goethe-Universität Frankfurt. (2022). Partnerships. *Digital Teaching and Learning Lab (DigiTeLL)*. Zugriff am 19.10.2022. Verfügbar unter: <https://www.uni-frankfurt.de/106208100/Partnerships#Naturwissenschaften>

Literaturverzeichnis

- Goldhausen, I. & Di Fuccia, D. (2020). Mathematisches Modellieren im Chemieunterricht. *CHEMKON, Early View*.
<https://doi.org/10.1002/ckon.201900075>
- Grebe-Ellis, J. (2005). *Grundzüge einer Phänomenologie der Polarisierung: Entwicklung einer phänomenologischen Beschreibung der Polarisierung als Grundlage für Curricula zur Polarisierung in Schule und Hochschule* (Phänomenologie in der Naturwissenschaft). Berlin: Logos.
- Grebe-Ellis, J. (2006). Phänomenologische Optik: eine „Optik der Bilder“. Erkenntnistheoretische, experimentiermethodische und didaktische Merkmale eines nichtreduktionistischen Zugangs zur Optik. *chimica etc. didacticae*, 97(32), 81–124.
- Greefrath, G., Kaiser, G., Blum, W. & Borromeo Ferri, R. (2013). Mathematisches Modellieren – Eine Einführung in theoretische und didaktische Hintergründe (Realitätsbezüge im Mathematikunterricht). In R. Borromeo Ferri, G. Greefrath & G. Kaiser (Hrsg.), *Mathematisches Modellieren für Schule und Hochschule: Theoretische und didaktische Hintergründe* (S. 11–37). Wiesbaden: Springer Fachmedien. https://doi.org/10.1007/978-3-658-01580-0_1
- Greefrath, G. & Weitendorf, J. (2013). Modellieren mit digitalen Werkzeugen. In R. Borromeo Ferri, G. Greefrath & G. Kaiser (Hrsg.), *Mathematisches Modellieren für Schule und Hochschule: Theoretische und didaktische Hintergründe* (S. 181–201). Wiesbaden: Springer Fachmedien. https://doi.org/10.1007/978-3-658-01580-0_9
- Gruneich, B. & Perkins, K. (n. d.). Farbwahrnehmung. *PhET*. Zugriff am 25.9.2022. Verfügbar unter: <https://phet.colorado.edu/en/simulations/color-vision>
- Grusche, S. (2018a). Entwurf einer phänomenbasierten Modellmethode. *PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*. Würzburg. Verfügbar unter: <http://www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/882>
- Grusche, S. (2018b). Qualitative Schulbuchanalyse zum Thema Linsenabbildung. *PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*. Würzburg. Verfügbar unter: <http://www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/880>
- Haagen-Schützenhöfer, C. (2017). Development of Research Based Teaching Materials: The Learning Output of a Course for Geometrical Optics for Lower Secondary Students (Springer Proceedings in Physics). In T. Greczyło & E. Dębowska (Hrsg.), *Key Competences in Physics Teaching and Learning* (Band 190, S. 105–116). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-44887-9_9
- Haagen-Schützenhöfer, C. & Hopf, M. (2018). Schülervorstellungen zur geometrischen Optik. In H. Schecker, T. Wilhelm, M. Hopf & R. Duit (Hrsg.), *Schülervorstellungen und Physikunterricht* (S. 89–114). Berlin, Heidelberg: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-57270-2_5

- Haagen-Schützenhöfer, C. & Wilhelm, T. (2021). Unterrichtskonzeptionen zur Geometrischen Optik. In T. Wilhelm, H. Schecker & M. Hopf (Hrsg.), *Unterrichtskonzeptionen für den Physikunterricht: Ein Lehrbuch für Studium, Referendariat und Unterrichtspraxis* (S. 17–49). Berlin, Heidelberg: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-63053-2_2
- Hacking, I. (1983). *Representing and intervening: introductory topics in the philosophy of natural science*. Cambridge ; New York: Cambridge University Press.
- Häder, M. & Häder, S. (2014). Stichprobenziehung in der quantitativen Sozialforschung. In N. Baur & J. Blasius (Hrsg.), *Handbuch Methoden der empirischen Sozialforschung* (S. 283–297). Wiesbaden: Springer Fachmedien. https://doi.org/10.1007/978-3-531-18939-0_18
- Harrison, A. G. & Treagust, D. F. (2000). A typology of school science models. *International Journal of Science Education*, 22(9), 1011–1026. Routledge. <https://doi.org/10.1080/095006900416884>
- Härtig, H., Neumann, K. & Erb, R. (2017). Experimentieren als Interaktion von Situation und Person: Ergebnisse einer Expertenbefragung. *ZfDN*, 23, 71–80.
- Hattie, J., Beywl, W. & Zierer, K. (2013). *Lernen sichtbar machen*. Baltmannsweiler: Schneider-Verl. Hohengehren.
- Hawking, S. W. (2018). *Eine kurze Geschichte der Zeit* (rororo). (H. Kober, Übers.) (23. Auflage). Reinbek bei Hamburg: Rowohlt Taschenbuch Verlag.
- Hertz, H. (1894). *Die Prinzipien der Mechanik in neuem Zusammenhange dargestellt*. Leipzig: Barth. Zugriff am 21.1.2021. Verfügbar unter: <http://archive.org/details/dieprinzipiende00hertgoog>
- Hirsch, N. (2020). *Unterricht digital: Methoden, Didaktik und Praxisbeispiele für das Lernen mit Online-Tools*. Mülheim an der Ruhr: Verlag an der Ruhr. Zugriff am 25.5.2021. Verfügbar unter: <https://epale.ec.europa.eu/de/resource-centre/content/unterricht-digital>
- HKM. (2016). Lehrplan Physik: Gymnasialer Bildungsgang. Jahrgangsstufen 7 bis 13. Zugriff am 23.6.2021. Verfügbar unter: <https://kultusministerium.hessen.de/sites/default/files/media/g9-physik.pdf>
- Hohenwarter, M. (2006). *GeoGebra – didaktische Materialien und Anwendungen für den Mathematikunterricht*. Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades an der Naturwissenschaftlichen Fakultät der Paris-Lodron-Universität Salzburg. Zugriff am 17.6.2021. Verfügbar unter: <https://www.geogebra.org/m/qe9dzbsm>
- Höttecke, D. (2001). Die Vorstellungen von Schülern und Schülerinnen von der „Natur der Naturwissenschaften“. *ZfDN*, 7, 7–23.
- Hupfeld, W. (2022). Dynasys. *Hupfeld-Software*. Zugriff am 25.9.2022. Verfügbar unter: <https://hupfeld-software.de/dokuwiki/doku.php/dynasys>

Literaturverzeichnis

- Johnson-Laird, P. N. (1983). *Mental Models: Towards a Cognitive Science of Language, Inference, and Consciousness*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- de Jong, T. (2006). COMPUTER SIMULATIONS: Technological Advances in Inquiry Learning. *Science*, 312(5773), 532–533.
- de Jong, T. (2019). Moving towards engaged learning in STEM domains; there is no simple answer, but clearly a road ahead. *Journal of Computer Assisted Learning*, 35(2), 153–167. <https://doi.org/10.1111/jcal.12337>
- van Joolingen, W. (2004). Roles of modeling in inquiry learning (S. 1096–1097). Gehalten auf der IEEE International Conference on Advanced Learning Technologies, 2004. Proceedings, Joensuu, Finland: IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICALT.2004.1357768>
- Jürgen, R.-G. & Kortenkamp, U. (2002). Dynamische Geometrie: Grundlagen und Möglichkeiten. In T. Weth (Hrsg.), *Tagungsband zum Nürnberger Kolloquium zur Didaktik der Mathematik 2002* (S. 369–372). Zugriff am 8.7.2002. Verfügbar unter: <https://cermat.org/sites/default/files/Richter-GeKortenkamp-DGGM-2002a.pdf>
- Kammerl, R., Unger, A., Günther, S. & Schwedler, A. (2016). *BYOD - Start in die nächste Generation. Abschlussbericht der wissenschaftlichen Evaluation des Pilotprojekts*. Hamburg: Universität Hamburg.
- Karaböcek, F. & Erb, R. (2015). Funktionale Aspekte des Experiments: Die Sicht der Lehrkraft. *PhyDid B – Didaktik der Physik – Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung (Nachtrag Frankfurt 2014)*. Wuppertal. Verfügbar unter: <http://www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/543>
- Kattmann, U., Duit, R., Gropengießer, H. & Komorek, M. (1997). Das Modell der Didaktischen Rekonstruktion - Ein Rahmen für naturwissenschaftsdidaktische Forschung und Entwicklung. *ZfDN*, 3(3), 3–18.
- Kerres, M. (2003). Wirkungen und Wirksamkeit neuer Medien in der Bildung (Education quality forum). In R. Keil-Slawik & M. Kerres (Hrsg.), *Wirkungen und Wirksamkeit Neuer Medien in der Bildung* (Band 1, S. 31–44). Münster: Waxmann.
- Kircher, E. (1995). *Studien zur Physikdidaktik: Erkenntnis- und wissenschaftstheoretische Grundlagen* (IPN). Kiel: Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften.
- Kircher, E. & Priemer, B. (2020). Nature of Science – Über die Natur der Naturwissenschaften lernen. In E. Kircher, R. Girwidz & H.E. Fischer (Hrsg.), *Physikdidaktik | Methoden und Inhalte* (S. 167–210). Berlin, Heidelberg: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-59496-4_6
- Kirstein, J., Haase, S., Mühlenbruch, T. & Nordmeier, V. (2016). 20 Jahre Interaktive Bildschirmexperimente. *PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*.

- Klahr, D. & Dunbar, K. (1988). Dual Space Search During Scientific Reasoning. *Cognitive Science*, 12(1), 1–48.
- KMK. (2005). *Bildungsstandards im Fach Physik für den Mittleren Schulabschluss (Jahrgangsstufe 10) - Beschluss der Kultusministerkonferenz vom 16.12.2004*. München: Luchterhand in Wolters Kluwer Deutschland. Zugriff am 5.2.2021. Verfügbar unter: https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen_beschluesse/2004/2004_12_16-Bildungsstandards-Physik-Mittleren-SA.pdf
- Koponen, I. T. (2007). Models and Modelling in Physics Education: A Critical Re-analysis of Philosophical Underpinnings and Suggestions for Revisions. *Science & Education*, 16(7), 751–773. <https://doi.org/10.1007/s11191-006-9000-7>
- Kramer, M., Förtsch, C., Aufleger, M. & Neuhaus, B. J. (2019). Der Einsatz digitaler Medien im gymnasialen Biologieunterricht. Eine deskriptive Auswertung einer quantitativen Videostudie. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*.
- Krell, M. (2013). *Wie Schülerinnen und Schüler biologische Modelle verstehen: Erfassung und Beschreibung des Modellverstehens von Schülerinnen und Schülern der Sekundarstufe I* (Biologie lernen und lehren). Berlin: Logos Verlag.
- Krell, M., Upmeyer zu Belzen, A. & Krüger, D. (2016). Modellkompetenz im Biologieunterricht. In A. Sandmann & P. Schmiemann (Hrsg.), *Biologiedidaktische Forschung: Schwerpunkte und Forschungsstände* (Band 1, S. 83–102). Berlin: Logos.
- Krell, M., Walzer, C., Hergert, S. & Krüger, D. (2019). Development and Application of a Category System to Describe Pre-Service Science Teachers' Activities in the Process of Scientific Modelling. *Research in Science Education*, 49(5), 1319–1345. <https://doi.org/10.1007/s11165-017-9657-8>
- Krüger, D. & Riemeier, T. (2014). Die qualitative Inhaltsanalyse – eine Methode zur Auswertung von Interviews. In D. Krüger, I. Parchmann & H. Schecker (Hrsg.), *Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung* (S. 133–145). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-37827-0_11
- 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* (MNU Themenreihe Bildungsstandards). (MNU Deutscher Verein zur Förderung des mathematischen und naturwissenschaftlichen Unterrichts e. V. & M. Kremer, Hrsg.) (1. Aufl.). Neuss: Klaus Seeberger. Zugriff am 21.4.2021. Verfügbar unter: https://www.mnu.de/images/blog/MNU-Themenheft_digitale_Werkzeuge/MNU-Themenheft_Innovativer_naturwissenschaftlicher_Unterricht_mit_digitalen_Werkzeugen.pdf

Literaturverzeichnis

- Landis, J. R. & Koch, G. G. (1977). The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. *Biometrics*, 33(1), 159. <https://doi.org/10.2307/2529310>
- Larsen, K. (2005). *Stephen Hawking: A Biography*. Greenwood Publishing Group.
- Laumann, D., Wichtrup, P. & Friege, G. (2019). Zwei Schlüssel zur Physik - Reale Experimente und digitale Medien als Schlüssel zu physikalischen Inhalten. *NiU Physik*, 30(171), 4–9.
- Lederman, N. G. (2007). Nature of science: Past, present, and future. In S.K. Abell & N.G. Lederman (Hrsg.), *Handbook of research on science education* (S. 831–879). Mahwah, N.J: Lawrence Erlbaum Associates.
- Lee, K. M. (2004). Presence, Explicated. *Communication Theory*, 14(1), 27–50. <https://doi.org/10.1111/j.1468-2885.2004.tb00302.x>
- Leisen, J. (2005). Wechsel der Darstellungsformen: Eine wichtige Strategie im kommunikativen Physikunterricht. *NiU Physik*, 16(87), 10–11.
- Leisner-Bodenthin, A. (2006). Zur Entwicklung von Modellkompetenz im Physikunterricht. *ZfDN*, (12), 91–109.
- Lindlahr, W. & Wendt, K. (2016). Virtual-Reality-Experimente. Experimentieren in realitätsnahen Simulationen. *NiU Physik*, 27(151), 26–28.
- List of interactive geometry software. (2021). *Wikipedia*. Zugriff am 14.6.2021. Verfügbar unter: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=List_of_interactive_geometry_software&oldid=1027594652
- Lück, S. (2008). Newton-II - Bewegungsgleichungen intuitiv gelöst. *CD zur Frühjahrstagung des Fachverbandes Didaktik der Physik in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft*. Zugriff am 24.4.2021. Verfügbar unter: https://did-apps.physik.uni-wuerzburg.de/Download/Artikel_DPG_Newton-II.pdf
- Lück, S. (2018). System-Modellierung über Veränderungsgrößen mit Fluxion. *Plus Lucis*, (4), 32–35.
- Lück, S. (n. d.). Did-Apps. *Software zum Lehren und Lernen - Lehrstuhl für Physik und ihre Didaktik - JMU Würzburg*. Zugriff am 25.9.2022. Verfügbar unter: <https://did-apps.physik.uni-wuerzburg.de/Did-Apps-Site/>
- Lund, T. (2012). Combining Qualitative and Quantitative Approaches: Some Arguments for Mixed Methods Research. *Scandinavian Journal of Educational Research*, 56(2), 155–165. Routledge. <https://doi.org/10.1080/00313831.2011.568674>
- Mackensen, M. v. & Ohlendorf, H.-C. (1998). *Modellfreie Optik (I)*. Pädagogische Forschungsstelle Kassel. Zugriff am 9.3.2021. Verfügbar unter: <https://www.forschung-waldorf.de/publikationen/detail/modellfreie-optik-i/>
- Mahr, B. (2008). Ein Modell des Modellseins – Ein Beitrag zur Aufklärung des Modellbegriffs. In U. Dirks & E. Knobloch (Hrsg.), *Modelle* (S. 187–220). Frankfurt am Main: Peter Lang Verlag.

- Mahr, B. (2015). Modelle und ihre Befragbarkeit Grundlagen einer allgemeinen Modelltheorie. *Erwägen Wissen Ethik*, 26(3), 329–342.
- Marr, B. (2019). What Is Extended Reality Technology? A Simple Explanation For Anyone. *Forbes*.
- Martschinke, S. (2001). *Aufbau mentaler Modelle durch bildliche Darstellungen: Eine experimentelle Studie über die Bedeutung der Merkmalsdimensionen Elaboriertheit und Strukturiertheit im Sachunterricht der Grundschule* (Internationale Hochschulschriften). Münster München Berlin: Waxmann.
- Mayer, J. (2007). Erkenntnisgewinnung als wissenschaftliches Problemlösen. In D. Krüger & H. Vogt (Hrsg.), *Theorien in der biologiedidaktischen Forschung* (S. 177–186). Springer.
- Mayer, R. (2005). Cognitive Theory of Multimedia Learning. In R. Mayer (Hrsg.), *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning* (S. 31–48). Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511816819.004>
- Mayring, P. (2015). *Qualitative Inhaltsanalyse: Grundlagen und Techniken* (12., überarbeitete Auflage.). Weinheim Basel: Beltz Verlag.
- Meschede, D. (2015). Strahlungsfelder (Springer-Lehrbuch). In D. Meschede (Hrsg.), *Gerthsen Physik* (S. 585–615). Berlin, Heidelberg: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-45977-5_13
- Mézes, C. (2016). *Zur Motivation beim Experimentieren im Physikunterricht*. Pädagogischen Hochschule Schwäbisch Gmünd. Zugriff am 20.12.2021. Verfügbar unter: <https://phsg.bsz-bw.de/frontdoor/index/index/docId/53>
- Mikelskis-Seifert, S. (2010). Piko-Brief Nr. 8 - Denken in und mit Modellen. *Physik im Kontext - Ein Programm zur Förderung der naturwissenschaftlichen Grundbildung durch Physikunterricht*. Zugriff am 9.2.2021. Verfügbar unter: <https://www.ipn.uni-kiel.de/de/das-ipn/abteilungen/didaktik-der-physik/piko/pikobriefe032010.pdf>
- Milgram, P. & Kishino, F. (1994). A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays. *IEICE Trans. Information Systems*, E77-D(12), 1321–1329.
- Millar, R. (2010). Practical work: In J. Osborne & J. Dillon (Hrsg.), *Good practice in science teaching: What research has to say* (S. 108–134). Maidenhead: Open University Press.
- Mishra, P. & Koehler, M. (2006). Technological Pedagogical Content Knowledge: A Framework for Teacher Knowledge. *Teachers College Record*, 108, 1017–1054.
- Mittelstraß, J. (2005). Anmerkungen zum Modellbegriff. *Modelle des Denkens - Streitgespräch in der Wissenschaftlichen Sitzung der Versammlung der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften am 12. Dezember 2003*, 65–68.

Literaturverzeichnis

- Moodle plugins directory: GeoGebra. (2022). *Moodle*. Zugriff am 29.9.2022. Verfügbar unter: https://moodle.org/plugins/qtype_geogebra
- Moser, K. S. (2003). Mentale Modelle und ihre Bedeutung: Kognitionspsychologische Grundlagen des (Miss-)Verstehens (Schriften zur Symbolforschung). In U. Ganz-Blättler (Hrsg.), *Sinnbildlich schief: Missgeschicke bei Symbolgenese und Symbolgebrauch* (S. 181–205). Bern ; New York: Lang.
- Muckenfuß, H. (1995). *Lernen im sinnstiftenden Kontext: Entwurf einer zeitgemäßen Didaktik des Physikunterrichts* (1. Auflage). Berlin: Cornelsen.
- Muckenfuß, H. (2001). Retten uns die Phänomene? Anmerkungen zum Verhältnis von Wahrnehmung und Theorie. *NiU Physik*, 12(63–64), 74–77.
- Muth, L. (2018). *Einfluss der Auswertephase von Experimenten im Physikunterricht: Ergebnisse einer Interventionsstudie zum Zuwachs von Fachwissen und experimenteller Kompetenz von Schülerinnen und Schülern* (Studien zum Physik- und Chemielernen). Berlin: Logos.
- Naumann, J. & Goldhammer, F. (2017). Time-on-task effects in digital reading are non-linear and moderated by persons' skills and tasks' demands. *Learning and Individual Differences*, 53, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2016.10.002>
- Nawrath, D., Maiseyenko, V. & Schecker, H. (2011). Experimentelle Kompetenz. Ein Modell für die Unterrichtspraxis. *PdN Physik in der Schule*, 60(6), 42–49.
- Nersessian, N. J. (2008). *Creating Scientific Concepts*. Cambridge, MA: MIT Press. Zugriff am 29.1.2021. Verfügbar unter: <http://ebookcentral.proquest.com/lib/senc/detail.action?docID=3338942>
- 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. Routledge. <https://doi.org/10.1080/09500693.2010.502191>
- Ortlieb, C. P. (2004). Mathematische Modelle und Naturerkenntnis. *mathematica didactica*, 27(1), 23–40.
- Partchev, I. (2004). *A visual guide to item response theory*. Jena: Friedrich-Schiller-Universität. Zugriff am 17.12.2021. Verfügbar unter: https://www.metheval.uni-jena.de/forschung_irt.php
- Peschel, F. (2002). Qualitätsmaßstäbe - Hilfen zur Beurteilung der Offenheit von Unterricht. (Beiträge zur Reform der Grundschule. 114). (U. Drews, Hrsg.) *Freiarbeit in der Grundschule. Offener Unterricht in Theorie, Forschung und Praxis*. Frankfurt am Main: Grundschulverband - Arbeitskreis Grundschule e.V. Zugriff am 6.6.2021. Verfügbar unter: <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0111-pedocs-176371>
- Peschel, M. (2009). Der Begriff der Offenheit beim Offenen Experimentieren. In D. Höttecke (Hrsg.), *Chemie- und Physikdidaktik für Lehramtsausbildung: Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik. Jahrestagung in Schwäbisch Gmünd 2008* (S. 268–270). Berlin: LIT. Zugriff am 6.6.2021. Verfügbar unter:

- <https://markus-peschel.de/publikationen/2009/der-begriff-der-offenheit-beim-offenen-experimentieren>
- Pietzner, V. (2009). Computer im naturwissenschaftlichen Unterricht – Ergebnisse einer Umfrage unter Lehrkräften. *ZfDN*, 15, 47–67.
- Puentedura, R. R. (2006). Transformation, Technology, and Education. Zugriff am 19.5.2020. Verfügbar unter: <http://www.hippasus.com/resources/tte/>
- Quick, T. & Grebe-Ellis, J. (2011). Wo wird das Bild einer unter Wasser liegenden Münze gesehen? *PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*. Münster. Verfügbar unter: <http://www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/299>
- Reference:Changelog 6.0. (2022). *GeoGebra Handbuch*. Zugriff am 25.9.2022. Verfügbar unter: https://wiki.geogebra.org/en/Reference:Changelog_6.0
- Reinfried, S., Mathis, C. & Kattmann, U. (2009). Das Modell der Didaktischen Rekonstruktion. Eine innovative Methode zur fachdidaktischen Erforschung und Entwicklung von Unterricht. *Beiträge zur Lehrerinnen- und Lehrerbildung*, 27(3), 404–414.
- Richtberg, S. & Girwidz, R. (2013). Entdeckendes Lernen mit dem Computer – Möglichkeiten und Anforderungen von Animationen und Simulationen. *NiU Physik*, 24(137), 14–17.
- Rolfes, T., Roth, J. & Schnotz, W. (2020). Learning the Concept of Function With Dynamic Visualizations. *Frontiers in Psychology*, 11. Frontiers. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.00693>
- Roth, J. (2008). Dynamik von DGS - Wozu und wie sollte man sie nutzen? In U. Kortenkamp, H.-G. Weigand & T. Weth (Hrsg.), *Informatische Ideen im Mathematikunterricht. Bericht über die 23. Arbeitstagung des Arbeitskreises „Mathematikunterricht und Informatik“ in der Gesellschaft für Didaktik der Mathematik e. V. vom 23. bis 25. September 2005 in Dillingen an der Donau* (S. 131–138). Hildesheim: Franzbecker. Zugriff am 5.6.2021. Verfügbar unter: https://www.juergen-roth.de/veroeffentlichungen/dynamik_von_dgs/roth_dynamik_von_dgs.pdf
- Schäffler, S. (2019). *Wissenschaftsphilosophie: Eine Einführung in die wissenschaftliche Modellbildung (essentials)*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-23871-1>
- Schaumburg, H. & Prasse, D. (2019). *Medien und Schule: Theorie - Forschung - Praxis* (Studententexte Bildungswissenschaft). Bad Heilbrunn: Verlag Julius Klinkhardt.
- Schecker, H. & Duit, R. (2018). Schülervorstellungen und Physiklernen. In H. Schecker, T. Wilhelm, M. Hopf & R. Duit (Hrsg.), *Schülervorstellungen und Physikunterricht* (S. 1–21). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-57270-2_1

Literaturverzeichnis

- Schecker, H., Klieme, E., Niedderer, H., Ebach, J. & Gerdes, J. (1999). *Abschlussbericht zum DFG-Projekt. Physiklernen mit Modellbildungssystemen: Förderung physikalischer Kompetenz und systemischen Denkens durch computergestützte Modellbildungssysteme*. Bremen, Berlin und Bonn. Zugriff am 7.5.2021. Verfügbar unter: http://www.idn.uni-bremen.de/pubs/DFG_PMS_Ab.pdf
- Schecker, H. P. (1998). *Physik - Modellieren: grafikorientierte Modellbildungssysteme im Physikunterricht* (Naturwissenschaftliche Reihe) (1. Aufl.). Stuttgart: Klett. Zugriff am 2.4.2021. Verfügbar unter: <http://docplayer.org/storage/75/71797941/1617386797/mr6TS7227414y0hRPJTcug/71797941.pdf>
- Schiefele, U. & Schaffner, E. (2015). Motivation (Springer-Lehrbuch). In E. Wild & J. Möller (Hrsg.), *Pädagogische Psychologie* (S. 153–175). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-41291-2_7
- Schlichting, H. J. (1995). Sonnentaler fallen nicht vom Himmel. *MNU*, 48(4), 199–207.
- Schmid, U., Goertz, L., Behrens, J. & Bertelsmann Stiftung. (2017). Monitor Digitale Bildung : Die Schulen im digitalen Zeitalter. BStift - Bertelsmann Stiftung.
- Schmider, E., Ziegler, M., Danay, E., Beyer, L. & Bühner, M. (2010). Is It Really Robust? Reinvestigating the Robustness of ANOVA Against Violations of the Normal Distribution Assumption. *Methodology*, 6(4), 147–151. Hogrefe Publishing. <https://doi.org/10.1027/1614-2241/a000016>
- Schnotz, W. & Bannert, M. (2003). Construction and interference in learning from multiple representation (External and Internal Representations in Multimedia Learning). *Learning and Instruction*, 13(2), 141–156.
- Schön, L., Erb, R., Weber, T., Werner, J., Grebe-Ellis, J. & Guderian, P. (2003). Optik in Mittel- und Oberstufe. Didaktik der Physik - Humboldt-Universität zu Berlin. Zugriff am 24.6.2021. Verfügbar unter: http://didaktik.physik.hu-berlin.de/material/forschung/optik/download/veroeffentlichungen/veroeffentlichungen_didaktik-hu.pdf
- Schön, L. & Guderian, P. (n. d.). Anfangsoptik. *AG Didaktik der Physik - HU Berlin*. Zugriff am 25.9.2022. Verfügbar unter: http://didaktik.physik.hu-berlin.de/material/PbPU_Anfangsoptik.html
- Schreiber, N. (2012). *Diagnostik experimenteller Kompetenz: Validierung technologiegestützter Testverfahren im Rahmen eines Kompetenzstrukturmodells* (Studien zum Physik- und Chemielernen). Berlin: Logos.
- Schreier, M. (2013). Qualitative Analyseverfahren (Springer-Lehrbuch). In W. Hussy, M. Schreier & G. Echterhoff (Hrsg.), *Forschungsmethoden in Psychologie und Sozialwissenschaften für Bachelor* (S. 245–275). Berlin, Heidelberg: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-34362-9_7

- Schroedter, S. & Körner, H.-D. (2012). Entwicklung eines Fragebogens zur Selbstwirksamkeitserwartung beim Experimentieren (SWE_EX). In S. Bernholt (Hrsg.), *Konzepte fachdidaktischer Strukturierung für den Unterricht. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Jahrestagung in Oldenburg 2011* (S. 164–166).
- Schubatzky, T. (Hrsg.). (2020). *Das Amalgam Anfangs-Elektrizitätslehreunterricht. Eine multiperspektivische Betrachtung in Deutschland und Österreich*. Berlin: Logos. <https://doi.org/10.30819/5159>
- Schulmeister, R. (2002). Taxonomie der Interaktivität von Multimedia- Ein Beitrag zur aktuellen Metadaten-Diskussion. *it - Information Technology*, 44(4).
- Schütte, K., Frenzel, A. C., Asseburg, R. & Pekrun, R. (2007). Schülermerkmale, naturwissenschaftliche Kompetenz und Berufserwartung. In M. Prenzel, C. Artelt, J. Baumert, W. Blum, M. Hammann, E. Klieme et al. (Hrsg.), *PISA 2006: die Ergebnisse der dritten internationalen Vergleichsstudie*. Münster München Berlin: Waxmann.
- Schwarz, C. V., Reiser, B. J., Davis, E. A., Kenyon, L., Achér, A., Fortus, D. et al. (2009). Developing a learning progression for scientific modeling: Making scientific modeling accessible and meaningful for learners. *Journal of Research in Science Teaching*, 46(6), 632–654. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/tea.20311>
- Shapiro, S. S. & Wilk, M. B. (1965). An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). *Biometrika*, 52(3/4), 591–611. [Oxford University Press, Biometrika Trust]. <https://doi.org/10.2307/2333709>
- Shulman, L. S. (1987). Knowledge and teaching. Foundations of the new reform. *Harvard educational review*, 57(1), 1–22.
- Spannagel, C. & Bescherer, C. (2009). Computerbezogene Selbstwirksamkeitserwartung in Lehrveranstaltungen mit Computernutzung. *Notes on Educational Informatics - Section A: Concepts and Techniques*, 5(1), 23–43.
- Staacks, S., Hütz, S., Heinke, H. & Stampfer, C. (2018). Advanced tools for smartphone-based experiments: phyphox. *Physics Education*, 53(4), 045009. IOP Publishing.
- Stachowiak, H. (1973). *Allgemeine Modelltheorie*. Springer.
- Stein, P. (2014). Forschungsdesigns für die quantitative Sozialforschung. In N. Baur & J. Blasius (Hrsg.), *Handbuch Methoden der empirischen Sozialforschung* (S. 135–151). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-531-18939-0_7
- Stinken-Rösner, L. (2019). Vom Luftballon zum Van-de-Graaff-Generator. Experimente zur Elektrostatik mit Augmented-Reality Erweiterung. *Unterricht Physik*, 30(171), 25–29.

Literaturverzeichnis

- Straube, P. (2016). *Modellierung und Erfassung von Kompetenzen naturwissenschaftlicher Erkenntnisgewinnung bei (Lehramts-) Studierenden im Fach Physik* (Studien zum Physik- und Chemielernen). Berlin: Logos Verlag.
- Strevens, M. (2017). How Idealizations Provide Understanding. In S.R. Grimm, C. Baumberger & S. Ammon (Hrsg.), *Explaining understanding: new perspectives from epistemology and philosophy of science* (S. 37–39). New York: Routledge.
- Suleder, M. (2020). Eine kurze Geschichte der Videoanalyse. *Plus Lucis*, (1), 4–6.
- Sullivan, E. & Khalifa, K. (2019). Idealizations and Understanding: Much Ado About Nothing? *Australasian Journal of Philosophy*, 97(4), 673–689. Routledge.
<https://doi.org/10.1080/00048402.2018.1564337>
- Teichrew, A. (2020). Regenbogen. *GeoGebra*. Zugriff am 25.9.2022. Verfügbar unter: <https://www.geogebra.org/m/exdfntvj>
- Teichrew, A. (2022a). Modellbildung mit GeoGebra. *GeoGebra*. Zugriff am 25.9.2022. Verfügbar unter: <https://www.geogebra.org/m/smkwf2bh>
- Teichrew, A. (2022b). Anfangsoptik. *GeoGebra*. Zugriff am 10.10.2022. Verfügbar unter: <https://www.geogebra.org/m/ukkxbmkn>
- Teichrew, A. (2022c). Geometrische Optik. *GeoGebra*. Zugriff am 11.10.2022. Verfügbar unter: <https://www.geogebra.org/m/wnsh27bn>
- Teichrew, A. & Erb, R. (2018a). Entwicklung der Modellkompetenz mit dem Zeigermodell am Doppelspalt. In C. Maurer (Hrsg.), *Qualitätsvoller Chemie- und Physikunterricht- normative und empirische Dimensionen. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Jahrestagung in Regensburg 2017* (S. 799–802). Universität Regensburg. Zugriff am 8.3.2021. Verfügbar unter: https://gdcp-ev.de/wp-content/tb2018/TB2018_799_Teichrew.pdf
- Teichrew, A. & Erb, R. (2018b). Implementierung modellbildender Lernangebote in das physikalische Praktikum. *PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*. Würzburg. Verfügbar unter: <http://www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/874>
- Teichrew, A. & Erb, R. (2020a). Augmented Reality-Experimente mit GeoGebra. *PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*. Verfügbar unter: <http://www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/1043>
- Teichrew, A. & Erb, R. (2020b). Hauptsache Augmented? Klassifikation digitalisierter Experimentierumgebungen. In K. Kaspar, M. Becker-Mrotzek, S. Hofhues, J. König & D. Schmeinck (Hrsg.), *Bildung, Schule und Digitalisierung*. Münster: Waxmann.
- Teichrew, A. & Erb, R. (2020c). Einsatz und Evaluation eines Augmented Reality-Experiments zur Optik. In S. Habig (Hrsg.), *Naturwissenschaftliche Kompetenzen in der Gesellschaft von morgen. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Jahrestagung in Wien 2019* (S. 987–990). Universität

- Duisburg-Essen. Zugriff am 9.3.2021. Verfügbar unter: <https://gdcp-ev.de/?p=3931>
- Teichrew, A. & Erb, R. (2020d). How augmented reality enhances typical classroom experiments: examples from mechanics, electricity and optics. *Physics Education*, 55(6), 065029. <https://doi.org/10.1088/1361-6552/abb5b9>
- Teichrew, A. & Erb, R. (2020e). Lernen mit Modellen und Experimenten: Von der Beobachtung zur Erkenntnis am Beispiel des Regenbogens. *MNU*, 73(6), 481–486.
- Teichrew, A. & Erb, R. (2021a). Experimente mit Augmented Reality erweitern: Einblendung virtueller Objekte mit GeoGebra am Spiegel. In J. Meßinger-Koppelt & J. Maxton-Küchenmeister (Hrsg.), *Naturwissenschaften digital: Toolbox für den Unterricht* (Band 2, S. 20–23). Hamburg: Joachim Herz Stiftung. Zugriff am 21.6.2021. Verfügbar unter: https://www.mint-digital.de/fileadmin/user_upload/210617_NW_Digital_Toolbox_Band_2_Webversion.pdf#page=20
- Teichrew, A. & Erb, R. (2021b). Online-Förderung physikalischer Konzepte mit Modellen und Experimenten. In S. Habig (Hrsg.), *Naturwissenschaftlicher Unterricht und Lehrerbildung im Umbruch? Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, virtuelle Jahrestagung 2020* (S. 205–208). Universität Duisburg-Essen. Verfügbar unter: https://gdcp-ev.de/wp-content/uploads/2021/05/GDCP_Band41_010521.pdf#page=225
- Teichrew, A. & Erb, R. (2022). Dynamisch modelliert. *Physik Journal*, 21(2), 25–28.
- Teichrew, A., Erb, R., Wilhelm, T. & Kuhn, J. (2019). Elektrostatische Potentiale und Felder im GeoGebra 3D Grafikrechner. *Physik in unserer Zeit*, 50(5), 254–255.
- Teichrew, A. & Grasse, M. (2021). Augmented Reality-Experimente zur Wellenphysik. *PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*. virtuell. Verfügbar unter: <http://www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/1140>
- Teichrew, A., Wilhelm, T. & Kuhn, J. (2021). Experimente im Science Journal dokumentieren. *Physik in unserer Zeit*, 52(1), 44–45. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/piuz.202170112>
- Tergan, S.-O. (1997). Multiple Views, Contexts, and Symbol Systems in Learning with Hypertext/Hypermedia: A Critical Review of Research. *Educational Technology*, 37(4), 5–18. Educational Technology Publications, Inc.
- Terzer, E. & Upmeyer zu Belzen, A. (2007). Naturwissenschaftliche Erkenntnisgewinnung durch Modelle. Modellverständnis als Grundlage für Modellkompetenz. *Berichte des Institutes für Didaktik der Biologie der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster, IDB*.
- Tesch, M. & Duit, R. (2004). Experimentieren im Physikunterricht - Ergebnisse einer Videostudie. *ZfDN*, 10, 51–69.

Literaturverzeichnis

- Thees, M., Kapp, S., Altmeyer, K., Malone, S., Brünken, R. & Kuhn, J. (2021). Comparing Two Subjective Rating Scales Assessing Cognitive Load During Technology-Enhanced STEM Laboratory Courses. *Frontiers in Education*, 6, 236. <https://doi.org/10.3389/educ.2021.705551>
- Theyßen, H., Schecker, H., Neumann, K., Eickhorst, B. & Dickmann, M. (2016). Messung experimenteller Kompetenz: Ein computergestützter Experimentiertest. *PhyDid A - Physik und Didaktik in Schule und Hochschule*, 15(1), 26–48.
- Thiele, M., Mikelskis-Seifert, S. & Wünscher, T. (2005). Modellieren - Schlüsselfähigkeit für physikalische Forschungs- und Lernprozesse. *PhyDid A - Physik und Didaktik in Schule und Hochschule*, 1(4), 30–46.
- Tobinski, D. A. (2017). *Kognitive Psychologie* (Springer-Lehrbuch). Berlin, Heidelberg: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-53948-4>
- Treagust, D. F., Chittleborough, G. & Mamiala, T. L. (2002). Students' understanding of the role of scientific models in learning science. *International Journal of Science Education*, 24(4), 357–368. Routledge. <https://doi.org/10.1080/09500690110066485>
- Trier, U. & Upmeier zu Belzen, A. (2009). „Wissenschaftler nutzen Modelle, um etwas Neues zu entdecken, und in der Schule lernt man einfach nur, dass es so ist.“ - Schülervorstellungen zu Modellen. *Erkenntnisweg Biologiedidaktik*, 8, 23–28.
- Ubben, M. (2020). *Typisierung des Verständnisses mentaler Modelle mittels empirischer Datenerhebung am Beispiel der Quantenphysik*. Berlin: Logos. <https://doi.org/10.30819/5181>
- Upmeier zu Belzen, A. & Krüger, D. (2010). Modellkompetenz im Biologieunterricht. *ZfDN*, 16, 41–57.
- Urhahne, D., Prenzel, M., von Davier, M., Senkbeil, M. & Bleschke, M. (2000). Computereinsatz im naturwissenschaftlichen Unterricht – Ein Überblick über die pädagogisch-psychologischen Grundlagen und ihre Anwendung. *ZfDN*, (6), 157–186.
- VDI. (2014). *VDI 3633 Blatt 1: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Grundlagen*. Berlin: Beuth.
- Vollmer, G. (1984). Jenseits des Mesokosmos. Anschaulichkeit in Physik und Didaktik. *Der Physikunterricht*, 18(1), 5–22.
- Vollmer, M. (2019). Regenbögen. *Atmosphärische Optik für Einsteiger* (S. 117–165). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-58362-3_5
- Vosniadou, S. (2012). Reframing the Classical Approach to Conceptual Change: Preconceptions, Misconceptions and Synthetic Models (Springer International Handbooks of Education). In B.J. Fraser, K. Tobin & C.J. McRobbie (Hrsg.),

- Second International Handbook of Science Education* (Band 24, S. 119–130). Dordrecht: Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9041-7_10
- Wagenschein, M. (2009). *Naturphänomene sehen und verstehen: genetische Lehrgänge*. (Lehrkustdidaktik). (H.C. Berg, Hrsg.) (4. Auflage.). Bern: hep.
- Ward, J. H. (1963). Hierarchical Grouping to Optimize an Objective Function. *Journal of the American Statistical Association*, 58(301), 236–244. Taylor & Francis. <https://doi.org/10.1080/01621459.1963.10500845>
- Weber, J. & Teichrew, A. (2021). Akzeptanzbefragung zu Augmented Reality-Experimenten auf dem Spielplatz. *PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*. virtuell. Verfügbar unter: <http://www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/1141/1229>
- Weber, J. & Wilhelm, T. (2020). The benefit of computational modelling in physics teaching: a historical overview. *European Journal of Physics*, 41(3), 034003. <https://doi.org/https://doi.org/10.1088/1361-6404/ab7a7f>
- Weber, J. & Wilhelm, T. (2021). Computereinsatz in der Newton'schen Mechanik - Vergleich von Modellbildung und Videoanalyse. *PhyDid A - Physik und Didaktik in Schule und Hochschule* (Band 1, S. 43–56). Zugriff am 24.4.2021. Verfügbar unter: <http://www.phydid.de/index.php/phydid/article/view/1091>
- Weber, J., Winkelmann, J., Erb, R., Wenzel, F., Ullrich, M. & Horz, H. (2016). Entwicklung von Messinstrumenten zum Kompetenzzuwachs anhand von Modellen der IRT. *PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*. Hannover. Zugriff am 16.12.2021. Verfügbar unter: <http://www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/700/830>
- Weinert, F. E. (2001). Vergleichende Leistungsmessung in Schulen - eine umstrittene Selbstverständlichkeit. *Leistungsmessung in Schulen* (S. 17–31). Weinheim und Basel: Beltz.
- Weisberg, M. (2007). Three Kinds of Idealization. *The Journal of Philosophy*, 104(12), 639–659. <https://doi.org/10.5840/jphil20071041240>
- Weltner, K. (1970). *Informationstheorie und Erziehungswissenschaft*. Quickborn: Schnelle.
- Wenzel, M. & Wilhelm, T. (2015). Erhebung zum Einsatz Neuer Medien bei Physik-Gymnasiallehrern. *PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*. Wuppertal. Zugriff am 15.4.2021. Verfügbar unter: <http://phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/601>
- Westphal, N. (2014). *Evaluation von phänomenbasiertem Physikunterricht: Seine Merkmale und Wirkungen auf Stereotypen, Selbstkonzept und Interesse*. Berlin: Humboldt-Universität zu Berlin, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät. Zugriff am 9.3.2021. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.18452/17004>

Literaturverzeichnis

- Wiesner, H. (1995). Physikunterricht - an Schülervorstellungen und Lernschwierigkeiten orientiert. *Unterrichtswissenschaft*, 23(2), 127–145. pedocs.
- Wiesner, H., Engelhardt, P. & Herdt, D. (1993). *Lichtquellen, Reflexion* (Unterricht Physik Band 1: Optik I). (G. Born & H. Harreis, Hrsg.). Köln: Aulis-Verl. Deubner.
- Wiesner, H., Engelhardt, P. & Herdt, D. (2007). *Brechung, Linsen* (Unterricht Physik Band 2: Optik II) (2. Auflage). Köln: Aulis-Verl. Deubner.
- Wilde, M., Bätz, K., Kovaleva, A. & Urhahne, D. (2009). Überprüfung einer Kurzskala intrinsischer Motivation (KIM). *ZfDN*, 15.
- Wilhelm, T. (2018). Zur Geschichte der mathematischen Modellbildung im Physikunterricht. *Plus Lucis*, (4), 4–10.
- Wilholt, T. (2005). Explaining Models: Theoretical and Phenomenological Models and Their Role for the First Explanation of the Hydrogen Spectrum. *Foundations of Chemistry*, 7(2), 149–169. <https://doi.org/10.1007/s10698-004-5958-x>
- Windschitl, M. & Thompson, J. (2006). Transcending Simple Forms of School Science Investigation: The Impact of Preservice Instruction on Teachers' Understandings of Model-Based Inquiry. *American Educational Research Journal*, 43(4), 783–835. <https://doi.org/10.3102/00028312043004783>
- Winkelmann, J. (2013). Abbildungsfehler im Physikunterricht. Veranschaulicht an der Schusterkugel in Experiment und Simulation. *MNU*, 66(2), 95–99.
- Winkelmann, J. (2015). *Auswirkungen auf den Fachwissenszuwachs und auf affektive Schülermerkmale durch Schüler- und Demonstrationsexperimente im Physikunterricht* (Studien zum Physik- und Chemielernen). Berlin: Logos.
- Winkelmann, J. (2019). Idealisierungen und Modelle im Physikunterricht. *PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*. Aachen. Verfügbar unter: <http://phydid.physik.fu-berlin.de/index.php/phydid-b/article/view/938>
- Winkelmann, J. (2020). Geometrische Optik: Ein Überblick über fachliche und didaktische Hintergründe. *NiU Physik*, 31(175), 2–7.
- Winkelmann, J. & Erb, R. (2014). Lernzuwachs durch Schüler- und Demonstrationsexperimente. Experimentiervorschläge zur geometrischen Optik. *MNU*, 67(7), 394–401.
- Winn, W., Stahr, F., Sarason, C., Fruland, R., Oppenheimer, P. & Lee, Y.-L. (2006). Learning oceanography from a computer simulation compared with direct experience at sea. *Journal of Research in Science Teaching*, 43(1), 25–42. <https://doi.org/10.1002/tea.20097>
- Winter, H. (1995). Mathematikunterricht und Allgemeinbildung. *Mitteilungen der Gesellschaft für Didaktik der Mathematik*, 21(61), 37–46.

- Wüstneck, K. D. (1963). Zur philosophischen Verallgemeinerung und Bestimmung des Modellbegriffs. *Deutsche Zeitschrift für Philosophie*, 11(12).
<https://doi.org/10.1524/dzph.1963.11.12.1504>
- Zierer, K. (2018). *Lernen 4.0: Pädagogik vor Technik: Möglichkeiten und Grenzen einer Digitalisierung im Bildungsbereich* (2., erweiterte Auflage.). Baltmannsweiler: Schneider Verlag Hohengehren GmbH.
- Zimmerman, B. J. (1995). Self-efficacy and educational development. In A. Bandura (Hrsg.), *Self-Efficacy in Changing Societies* (S. 202–231). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511527692.009>

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 1: Epistemisches Muster nach Mahr (2008)..... | 6 |
| Abbildung 2: Vereinfachter Integrationsprozess verbaler und bildhafter Information in Form von mentalen Modellen und dem Vorwissen in der CTML nach Mayer (2005) | 8 |
| Abbildung 3: Beziehung zwischen einem realen Problem, dem mentalen Modell und dem realen Modellobjekt..... | 9 |
| Abbildung 4: Beziehung zwischen dem Modell, dem Original und dem Subjekt nach Wüstneck (1963) | 13 |
| Abbildung 5: Wissenschaftliche Praxis nach Giere (2004)..... | 15 |
| Abbildung 6: Beziehung von Phänomen, Theorie und empirischen Ergebnissen zu wissenschaftlichen Modellen | 17 |
| Abbildung 7: Modellierungsprozess nach Ortlieb (2004)..... | 26 |
| Abbildung 8: Modellierungsprozess nach Blum und Leiß (2005) | 27 |
| Abbildung 9: Naturwissenschaftliche Erkenntnisgewinnung nach Krell et al. (2016, 2019)..... | 28 |
| Abbildung 10: Grafik-Ansicht eines Modells zum radioaktiven Zerfall nach Schecker (1998, S. 9f) in <i>SageModeler</i> | 38 |
| Abbildung 11: Klassische Aufteilung von Experimentier- und Modellkompetenz | 52 |
| Abbildung 12: Kreislauf der Erkenntnisgewinnung mit Lernschritten, -produkten und -medien | 55 |
| Abbildung 13: Spannungsfeld physikalischer Modellbildung | 57 |
| Abbildung 14: Simulation zur Farbwahrnehmung..... | 61 |
| Abbildung 15: Rolle eines dynamischen Modells innerhalb der Modellbildung am Beispiel der Entstehung des Spiegelbildes | 63 |
| Abbildung 16: Virtuality Continuum (nach Milgram & Kishino, 1994)..... | 64 |
| Abbildung 17: AR-Experiment zum Spiegelbild am ebenen Spiegel | 69 |
| Abbildung 18: Aufnahme eines Regenbogens an einem Springbrunnen | 73 |
| Abbildung 19: Dynamisches Modell zur Visualisierung der Brechung und Reflexion in einer Kugel | 75 |
| Abbildung 20: Dynamisches Modell zur Simulation der scheinbaren Lage eines Regenbogens..... | 76 |
| Abbildung 21: AR-Experiment zum Regenbogen..... | 77 |
| Abbildung 22: Ausschnitt aus einem Video zur Erfassung der Arbeit mit dem dynamischen Modell zum Lichtweg durch eine Halbkreisscheibe | 86 |
| Abbildung 23: Ausschnitt aus einem Video zur Erfassung des Experiments nach der Arbeit mit dem Modell | 87 |
| Abbildung 24: Experiment mit einem Linienlaser zum Lichtweg durch eine Halbkreisscheibe | 89 |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|-----|
| Abbildung 25: Häufigkeitsverteilung der Fachsemester der Studierenden | 92 |
| Abbildung 26: Variationsmöglichkeiten im dynamischen Modell zur Brechung an der Halbkreisscheibe..... | 99 |
| Abbildung 27: Messbezogene Einstellungen (a) bis (d) im dynamischen Modell zur Brechung an der Halbkreisscheibe | 100 |
| Abbildung 28: Boxplots der umkodierte quantitativ erhobene Variablen (N = 41). | 115 |
| Abbildung 29: Boxplots der gemessenen Zeiten der Interaktion mit dem Modell und der Auseinandersetzung mit dem Experiment (N = 20).... | 117 |
| Abbildung 30: Absteigend sortiertes Säulendiagramm der relativen Häufigkeiten erreichter Ziele des Modells | 119 |
| Abbildung 31: Screeplot der Hauptkomponentenanalyse der zwölf Ziele des Modells..... | 121 |
| Abbildung 32: Absteigend sortiertes Säulendiagramm der relativen Häufigkeiten erreichter Ziele des Experiments..... | 123 |
| Abbildung 33: Nach Differenzen aufsteigend sortiertes Säulendiagramm der relativen Häufigkeiten erreichter Ziele des Modells und Experiments | 124 |
| Abbildung 34: Absteigend sortiertes Säulendiagramm der relativen Häufigkeiten kodierter Hypothesen | 127 |
| Abbildung 35: Nach Differenzen absteigend sortiertes Säulendiagramm der relativen Häufigkeiten der Hypothesen und ihrer protokollierten Überprüfung | 131 |
| Abbildung 36: Absteigend sortiertes Säulendiagramm der relativen Häufigkeiten kodierter Gemeinsamkeiten (hellgrau), Unterschiede des Modells im Vergleich zum Experiment (grau) und umgekehrt (dunkelgrau). | 133 |
| Abbildung 37: Streudiagramm des Fachwissens und der experimentierbezogenen SWE..... | 137 |
| Abbildung 38: Blasendiagramm der vier Cluster zu den drei Faktoren der Arbeit mit dem Modell..... | 151 |
| Abbildung 39: Profillinien der vier Cluster zu den Komponenten der Arbeit mit dem Modell..... | 152 |
| Abbildung 40: Profillinien der vier Cluster zu den lernbezogenen Merkmalen | 154 |
| Abbildung 41: Profillinien der vier Cluster zu den Kernhypothesen | 155 |
| Abbildung 42: Profillinien der vier Cluster zur Überprüfung der Kernhypothesen | 156 |
| Abbildung 43: Profillinien der vier Cluster zu den Skalen der intrinsischen Motivation..... | 157 |
| Abbildung 44: Umgestaltete Elemente (a) bis (g) des dynamischen Modells zum Lichtweg durch eine Halbkreisscheibe | 169 |
| Abbildung 45: Umgestaltetes dynamisches Modell zum Lichtweg durch eine Halbkreisscheibe als GeoGebra-Aktivität..... | 171 |

| | |
|---|-----|
| Abbildung 46: Dynamisches Modell zum Lichtweg durch eine Halbkreisscheibe im <i>GeoGebra 3D Rechner</i> | 172 |
| Abbildung 47: Gestaltungsebenen von dynamischen Modellen | 173 |
| Abbildung 48: Mehrdeutigkeit von 2D-Darstellungen am Beispiel der Spiegelachse..... | 174 |
| Abbildung 49: Dynamisches Modell zum Schatten mit (a) umgesetzten und (b) gegenteiligen Gestaltungsempfehlungen | 176 |
| Abbildung 50: Vereinfachter Erkenntnisprozess beim Lernen mit Modellen und Experimenten für Lernende..... | 182 |
| Abbildung 51: Dynamisches Modell zum Lichtweg..... | 186 |
| Abbildung 52: Dynamisches Modell zur Lichtausbreitung | 188 |
| Abbildung 53: Dynamisches Modell zur Streuung | 189 |
| Abbildung 54: Dynamisches Modell zum Sehvorgang | 191 |
| Abbildung 55: Dynamisches Modell zur Schattenfläche..... | 193 |
| Abbildung 56: Dynamisches Modell zu Kern- und Halbschatten | 195 |
| Abbildung 57: Dynamisches Modell zum Übergangsschatten..... | 196 |
| Abbildung 58: Dynamisches Modell zu Abbildungen an Lochblenden | 197 |
| Abbildung 59: Dynamisches Modell zur Reflexion..... | 200 |
| Abbildung 60: Dynamisches Modell zum Spiegelbild | 201 |
| Abbildung 61: Dynamisches Modell zur Spiegelgröße | 203 |
| Abbildung 62: Dynamisches Modell zur Lochkamera..... | 206 |
| Abbildung 63: Dynamisches Modell zur Länge des geradlinigen Lichtwegs .. | 208 |
| Abbildung 64: Dynamisches Modell zur Länge des reflektierten Lichtwegs ... | 209 |
| Abbildung 65: Dynamisches Modell zur optischen Weglänge des gebrochenen Lichtwegs | 210 |
| Abbildung 66: Dynamisches Modell zum Lichtweg durch eine Halbkreisscheibe | 212 |
| Abbildung 67: Dynamisches Modell einer Winkelscheibe | 213 |
| Abbildung 68: Dynamisches Modell zur optischen Hebung mit dem (a) sagittalen und (b) meridionalen Bild | 214 |
| Abbildung 69: Dynamisches Modell zur optischen Verschiebung | 215 |
| Abbildung 70: Dynamisches Modell zur Totalreflexion | 216 |
| Abbildung 71: Dynamisches Modell zur Brechung an gekrümmten Flächen.. | 218 |
| Abbildung 72: Dynamisches Modell zur Brechung an einer Sammellinse | 219 |
| Abbildung 73: Dynamisches Modell zur Abbildung an einer Sammellinse (reelles Bild) | 220 |
| Abbildung 74: Dynamisches Modell zur Abbildung an einer Sammellinse (virtuelles Bild)..... | 221 |
| Abbildung 75: Dendrogramm zur Clusteranalyse der drei Faktoren der Arbeit mit dem Modell..... | 299 |
| Abbildung 76: AR-Experiment zur Lichtausbreitung | 300 |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|-----|
| Abbildung 77: AR-Experiment zur Streuung..... | 300 |
| Abbildung 78: AR-Experiment zur Schattenfläche..... | 301 |
| Abbildung 79: AR-Experiment zu Kern- und Halbschatten..... | 301 |
| Abbildung 80: AR-Experiment zum Übergangsschatten | 301 |
| Abbildung 81: AR-Experiment zur Reflexion mit dem Blick auf (a) den Spiegel und (b) den Lichtfleck an der Decke..... | 302 |
| Abbildung 82: AR-Experiment zum Spiegelbild | 302 |
| Abbildung 83: AR-Experiment zur Spiegelgröße | 303 |
| Abbildung 84: AR-Experiment zur Bildgröße mit (a) der Seitenansicht und (b) dem Blick auf den Schirm | 304 |
| Abbildung 85: AR-Experiment zur Länge des geradlinigen Lichtwegs mit (a) einer größeren und (b) der kürzesten Weglänge..... | 305 |
| Abbildung 86: AR-Experiment zur Länge des reflektierten Lichtwegs mit (a) einer größeren und (b) der kürzesten Weglänge..... | 306 |
| Abbildung 87: AR-Experiment zur optischen Länge des gebrochenen Lichtwegs mit (a) einer größeren und (b) der kürzesten optischen Weglänge | 307 |
| Abbildung 88: AR-Experiment zur optischen Hebung mit (a) der Seitenansicht und (b) dem Blick auf die angehobene Münze | 308 |
| Abbildung 89: AR-Experiment zur optischen Verschiebung mit (a) dem ungehinderten Blick auf die Münze und (b) durch den Glasblock | 309 |
| Abbildung 90: AR-Experiment zur Brechung an gekrümmten Flächen | 310 |
| Abbildung 91: AR-Experiment zur Brechung an einer Sammellinse..... | 310 |
| Abbildung 92: AR-Experiment zur Abbildung an einer Sammellinse mit (a) der Seitenansicht und (b) dem Blick auf den Schirm..... | 311 |
| Abbildung 93: AR-Experiment zur Verwendung einer Sammellinse als Lupe mit (a) der Seitenansicht und (b) dem Blick durch die Linse | 312 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|-------------|--|-----|
| Tabelle 1: | Klassifikation von Modellen im Natur-Idee-Kontinuum..... | 12 |
| Tabelle 2: | Drei Arten des Modellverständnisses mit Beispielaussagen zu den fünf Teilkompetenzen angelehnt an Upmeier zu Belzen und Krüger (2010) nach Teichrow und Erb (2018a)..... | 25 |
| Tabelle 3: | Merkmale digitalisierter Experimentierumgebungen mit den Ausprägungen real oder virtuell | 65 |
| Tabelle 4: | Objekte und Inhalte zum Spiegelbild am ebenen Spiegel | 68 |
| Tabelle 5: | Phasen und Aktivitäten während eines AR-Experiments mit <i>GeoGebra</i> | 70 |
| Tabelle 6: | Beim Lernen mit Modellen und Experimenten geforderte und geförderte Experimentier- und Modellkompetenzen..... | 72 |
| Tabelle 7: | Grundlagen und Typen der in verschiedenen Phasen erhobenen Daten | 94 |
| Tabelle 8: | Interkoderübereinstimmung der Erfassung der Ziele des Modells | 101 |
| Tabelle 9: | Intrakoderübereinstimmung der Kategorisierung der Hypothesen | 104 |
| Tabelle 10: | Aufteilung der positiven und negativen Aspekte in innerhalb und außerhalb der Handlung | 108 |
| Tabelle 11: | Interkoderübereinstimmung der Erfassung der Ziele des Experiments | 110 |
| Tabelle 12: | Intrakoderübereinstimmung der Kategorisierung der Gemeinsamkeiten und Unterschiede | 112 |
| Tabelle 13: | Rotierte Komponentenmatrix (links) und Koeffizientenmatrix (rechts) der zwölf Ziele des Modells..... | 122 |
| Tabelle 14: | Rotierte Komponentenmatrix (links) und Koeffizientenmatrix (rechts) der neun Ziele des Experiments | 126 |
| Tabelle 15: | Inhaltliche Zusammenfassung der elf Hypothesenkategorien zu fünf Kernhypothesen | 128 |
| Tabelle 16: | Absolute H und relative Häufigkeiten h der positiven und negativen Motivationsaspekte aufgeteilt nach innerhalb und außerhalb der Handlung | 129 |
| Tabelle 17: | Anteile der Studierenden mit und ohne Aussagen zu den Kernhypothesen nach dem Modell und ihrer Überprüfung im Experiment..... | 132 |
| Tabelle 18: | Rotierte Komponentenmatrix (links) und Koeffizientenmatrix (rechts) der sieben Unterschiede zwischen Modell und Experiment..... | 134 |
| Tabelle 19: | Korrelationen der Subskalen der <i>mathematischen SWE</i> | 135 |
| Tabelle 20: | Rangkorrelationen nach Spearman der computerbezogenen Skalen | 136 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|-------------|--|-----|
| Tabelle 21: | Korrelationen der lernbezogenen Merkmale | 137 |
| Tabelle 22: | Korrelationen der Merkmale der Arbeit mit dem Modell | 138 |
| Tabelle 23: | Korrelationen der lernbezogenen Merkmale mit den Merkmalen der Arbeit mit dem Modell | 139 |
| Tabelle 24: | Korrelationen der Skalen intrinsischer Motivation | 141 |
| Tabelle 25: | Korrelationen der Skalen intrinsischer Motivation mit den Merkmalen der Arbeit mit dem Modell..... | 142 |
| Tabelle 26: | Korrelationen der Kernhypothesen..... | 143 |
| Tabelle 27: | Korrelationen der Merkmale des Experiments ($N = 20$) | 146 |
| Tabelle 28: | Korrelationen der Merkmale des Experiments mit den lernbezogenen Merkmalen sowie der Arbeit mit dem Modell.. | 147 |
| Tabelle 29: | Korrelationen der Kernhypothesen und ihrer Überprüfung im Rahmen des Vergleichs zwischen Modell und Experiment..... | 148 |
| Tabelle 30: | Korrelationen der formulierten Unterschiede mit den Merkmalen der Arbeit mit dem Modell und des Experimentierens..... | 150 |
| Tabelle 31: | Sachstruktur des Unterrichtskonzepts..... | 183 |
| Tabelle 32: | Planungsraster zum Lernen mit Modellen und Experimenten mit Leitfragen zum Ausfüllen..... | 257 |
| Tabelle 33: | Phänomene, Modelle und Hypothesen der Lektionen der Lernumgebung | 258 |
| Tabelle 34: | Planungsraster zum Lichtweg durch eine Halbkreisscheibe ... | 259 |
| Tabelle 35: | Schwierigkeit b_i und Trennschärfe a_i ausgewählter Aufgaben des Rasch-skalierten Fachwissenstests zur Brechung (fwb) nach Weber et al. (2016) | 260 |
| Tabelle 36: | Skala zur mathematischen SWE (mse) nach Bescherer (2004) | 268 |
| Tabelle 37: | Skala zur experimentierbezogenen SWE (ese) nach Schroedter und Körner (2012)..... | 268 |
| Tabelle 38: | Verkürzte Skala zur <i>computerbezogenen SWE</i> (cse) mit Items zur <i>Computerangst</i> (can) und <i>Computer beim Lernen</i> (cle) nach Spannagel und Bescherer (2012, zitiert nach Mézes, 2016, S. 108f) | 269 |
| Tabelle 39: | Kategorien und Beschreibungen der Ziele bei der Arbeit mit dem dynamischen Modell zur Brechung an der Halbkreisscheibe .. | 270 |
| Tabelle 40: | Kategorien und Beschreibungen der Hypothesen bei der Arbeit mit dem dynamischen Modell zur Brechung an der Halbkreisscheibe | 271 |
| Tabelle 41: | Formulierte Hypothesen der Teilnehmenden und zugeordnete Kategorien..... | 273 |
| Tabelle 42: | Kurzskala intrinsischer Motivation (kim) nach Wilde et al. (2009) | 279 |

| | | |
|-------------|---|-----|
| Tabelle 43: | Kategorien und Beschreibungen der positiven Motivationsaspekte bei der Arbeit mit einem dynamischen Modell | 280 |
| Tabelle 44: | Kategorien und Beschreibungen der negativen Motivationsaspekte bei der Arbeit mit einem dynamischen Modell | 282 |
| Tabelle 45: | Kategorien und Beschreibungen der Ziele des Experiments zur Brechung an der Halbkreisscheibe | 284 |
| Tabelle 46: | Kategorien und Beschreibungen der Gemeinsamkeiten und Unterschiede beim Vergleich zwischen Modell und Experiment | 285 |
| Tabelle 47: | Protokollierte Gemeinsamkeiten und Unterschiede und zugeordnete Kategorien | 287 |
| Tabelle 48: | Skalenkennwerte der quantitativ erhobenen Merkmale | 292 |
| Tabelle 49: | Häufigkeitswerte der qualitativ erfassten Ziele des Modells | 293 |
| Tabelle 50: | Häufigkeitswerte der qualitativ erfassten Ziele des Experiments und der entsprechenden Ziele des Modells ($N = 20$) | 294 |
| Tabelle 51: | Ergebnisse der t-Tests bei verbundenen Stichproben zu den Unterschieden der im Modell und Experiment erreichten Ziele ($N = 20$) | 294 |
| Tabelle 52: | Häufigkeitswerte der qualitativ erfassten Hypothese nach der Arbeit mit dem Modell | 295 |
| Tabelle 53: | Häufigkeitswerte der qualitativ erfassten Gemeinsamkeiten und Unterschiede beim Vergleich zwischen Modell und Experiment | 296 |
| Tabelle 54: | Ergebnisse der t-Tests bei unabhängigen Stichproben zum Faktor <i>Anpassung der Oberfläche des Modells</i> (aom) in Abhängigkeit der formulierten Kernhypothesen | 297 |
| Tabelle 55: | Ergebnisse der t-Tests bei unabhängigen Stichproben zum Faktor <i>Veränderung der Eigenschaften des Modells</i> (vem) in Abhängigkeit der formulierten Kernhypothesen | 297 |
| Tabelle 56: | Ergebnisse der t-Tests bei unabhängigen Stichproben zum Faktor <i>Untersuchung des Systems im Modell</i> (usm) in Abhängigkeit der formulierten Kernhypothesen | 298 |
| Tabelle 57: | Ergebnisse der t-Tests bei unabhängigen Stichproben zum lernbezogenen Merkmal <i>Fachwissen zur Brechung</i> (fwb) in Abhängigkeit der formulierten Kernhypothesen | 298 |

Anhang

Planungsraster

Tabelle 32: Planungsraster zum Lernen mit Modellen und Experimenten mit Leitfragen zum Ausfüllen

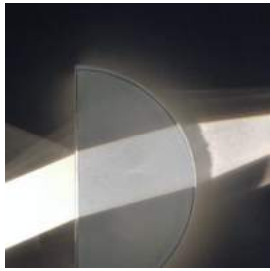
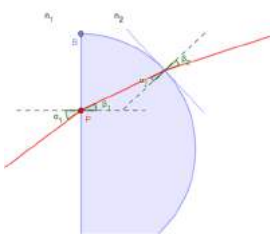

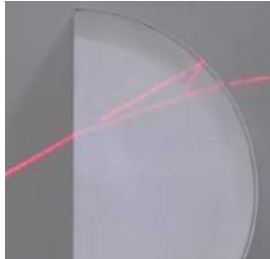
| | Lernprodukte | Lernschritte | Lernmedien |
|------------|--|--|---|
| Phänomen | Welche bemerkenswerte Erscheinung wird behandelt? | Verallgemeinern Wie sind die Umstände, die bei der Beobachtung des Phänomens regelmäßig auftreten? Wie lässt sich das Phänomen im Allgemeinen beschreiben? | Dokumentation Schilderungen von Alltagsbeobachtungen? Fotos und Videos? Qualitative Demonstrationen? |
| | Wie wird das Phänomen naturwissenschaftlich beschrieben? | Abstrahieren Welche naturwissenschaftlichen Ideen und nicht beobachtbaren Elemente werden eingeführt? Welche Idealisierungen müssen vorgenommen werden? | Visualisierung Größen und ihre Zusammenhänge? Statische Skizzen? Dynamische Konstruktionen oder Animationen? |
| Hypothese | Wie lauten die qualitativen und quantitativen Vorhersagen? | Konkretisieren Welche Annahmen werden gemacht? Wie sehen die Vorkehrungen aus? Welche Ergebnisse sind zu erwarten? | Simulation Berechnungen? Fehlerabschätzungen? Simulationen? |
| Experiment | Wie werden die Vorhersagen experimentell überprüft? | Evaluieren Wie sieht der Aufbau aus? Welche Messgeräte werden verwendet? Wie werden die Messungen ausgewertet? | Messwertfassung Materialien und Messgeräte? Tabellen und Diagramme? Videoanalyse? Sensoren und Smartphones? |
| Reflexion | Experiment | Wie gut entspricht der Aufbau den Annahmen? | |
| | Hypothese | Wie gut passen die experimentellen Ergebnisse zu der Hypothese? | |
| | Modell | Wie gut entspricht das Modell der Realität? Welche Aspekte wurden nicht bedacht? Welche alternativen Modelle kann es geben? | |
| | Phänomen | Welche Antwort lässt sich auf die anfangs aufgestellte Fragestellung formulieren? Welche Einschränkungen gibt es? | |
| | Beobachtung | Auf welche anderen Situationen lässt sich die Antwort anwenden? | |

Lerninhalte der Lernumgebung

Tabelle 33: Phänomene, Modelle und Hypothesen der Lektionen der Lernumgebung

| | Phänomen | Modell | Hypothese |
|------------------|---|---|---|
| Lichtausbreitung | Lücken in der Wolkendecke führen zu interessanten Lichterscheinungen. Anhand von geraden Schattengrenzen lässt sich die Lichtausbreitung charakterisieren. | Lichtwege, die neben und entlang einer Schattengrenze verlaufen, werden auf ihre Länge hin verglichen. | Licht nimmt zwischen zwei Punkten den kürzesten Weg. |
| Lichtreflexion | Wenn sich Objekte im Wasser spiegeln, trifft das Licht zuerst die Wasseroberfläche und geht dann ins Auge. Schattengrenzen am Spiegel deuten auf einen Knick in der Lichtausbreitung an. | Lichtwege, die über verschiedene Stellen am Spiegel von einer Lichtquelle zu einem Empfänger verlaufen, werden auf ihre Länge hin verglichen. | Licht nimmt über einen Spiegel den kürzesten Weg, wobei das Reflexionsgesetz gilt. |
| Lichtbrechung | Wenn sich Objekte unter Wasser befinden, dann erscheinen sie flacher als sonst. Schattengrenzen am Plexiglasblock deuten auf einen Knick in der Lichtausbreitung an der Grenzfläche an. | Lichtwege, die über verschiedene Stellen durch eine Grenzfläche zwischen zwei Medien von einer Lichtquelle zu einem Empfänger verlaufen, werden auf ihre optische Länge hin verglichen. | Licht nimmt an einer Grenzfläche zwischen zwei Medien den Weg mit der kürzesten Laufzeit (qualitative Form des Brechungsgesetzes). |
| Brechungsgesetz | Zur Untersuchung der Lichtbrechung werden Halbkreisscheiben aus Plexiglas verwendet. Ein breites Lichtbündel deutet eine zweifache Brechung des Lichts an, das durch die Halbkreisscheibe verläuft. | Lichtwege, die über verschiedene Stellen in die Halbkreisscheibe eintreten, werden auf ihre Einfallswinkel hin untersucht. Zusätzlich zu den Winkeln werden die senkrecht auf dem Lot stehenden Gegenkatheten $h = \sin(\alpha) \cdot r$ gemessen. | Licht wird beim Ein- und Austritt gebrochen. Zur Messung des Brechungswinkels muss die Mitte der Halbkreisscheibe getroffen werden. Das Produkt aus n_1 und $\sin(\alpha)$ ist gleich dem Produkt aus n_2 und $\sin(\beta)$ (quantitative Form des Brechungsgesetzes). |
| Ausblick | Totalreflexion: Licht wird beim Übergang von einem Medium in ein anderes unter bestimmten Umständen vollständig reflektiert. | Die Intensitäten des einfallenden, reflektierten und gebrochenen Lichts werden für verschiedene Einfallswinkel visualisiert. | Totalreflexion liegt beim Übergang von optisch dichten in dünne Medien ab einem Grenzwinkel vor, bei dem der Brechungswinkel von 90° erreicht wird. |
| | Optische Hebung: Gegenstände unter Wasser erscheinen etwas angehoben. | Der Lichtweg von einem Gegenstandspunkt unter Wasser und seine Verlängerung werden visualisiert. | Optische Hebung hängt von Füllhöhe, Aufsichtswinkel und Brechungsindex der Flüssigkeit ab. |

Tabelle 34: Planungsraster zum Lichtweg durch eine Halbkreisscheibe

| | Lernprodukte | Lernschritte | Lernmedien |
|------------|---|--|---|
| Phänomen | Zur Messung des Brechungswinkels beim Übergang von Luft zu Glas werden oft Halbkreisscheiben verwendet. Wie geht man am besten vor? | Die Grenzen eines breiten Lichtbündels einer Experimentierleuchte deuten darauf, dass das Licht sowohl beim Eintritt als auch beim Austritt gebrochen wird. | Dokumentation  |
| Modell | Der Lichtweg durch eine Halbkreisscheibe wird dargestellt. | Das Licht trifft im Punkt P auf die flache Seite der Halbkreisscheibe. Das Lot sowie Einfallswinkel und Brechungswinkel beim Ein- und Austritt werden in Abhängigkeit des Brechungsindex n_2 visualisiert. | Visualisierung  |
| Hypothese | Das Licht wird beim Eintritt zum Lot hin und beim Austritt vom Lot weg gebrochen. | Zur Messung des Brechungswinkels beim Eintritt muss das Licht betrachtet werden, das durch die Mitte der Halbkreisscheibe verläuft. Sie muss zudem mittig auf einer Winkelscheibe positioniert werden. | Simulation  |
| Experiment | Es wird die Leuchtspur eines Linienlasers durch eine Halbkreisscheibe aus Plexiglas auf dem Tisch verfolgt. | Zur genauen Messung des Brechungswinkels müssen Laser, Halbkreis- und Winkelscheibe präzise ausgerichtet werden, da ansonsten die Brechung beim Austritt die Messung verfälscht. | Messwertfassung  |
| Reflexion | Experiment | Das Licht verläuft nicht nur seitlich durch die Halbkreisscheibe, sondern dringt auch von oben ein und hinterlässt eine scheinbar ungebrochene Leuchtspur. | |
| | Hypothese | Die Brechung beim Ein- und Austritt kann im Experiment beobachtet werden. Die Form ist für eine genaue Messung des Brechungswinkels beim Eintritt geeignet. | |
| | Modell | Im Modell fehlen (neben dem scheinbar ungebrochenen Licht) die Reflexion beim Eintritt sowie unter bestimmten Winkeln die Totalreflexion beim Austritt. | |
| | Phänomen | Beim Experimentieren mit einer Halbkreisscheibe wird das Licht wie bei einer Linse fokussiert. | |

Aufgaben des Fachwissentest zur Brechung

Tabelle 35: Schwierigkeit b_i und Trennschärfe a_i ausgewählter Aufgaben des Rasch-skalierten Fachwissenstests zur Brechung (fwb) nach Weber et al. (2016)

| Titel | b_i | a_i | Name |
|--|-------|-------|-------|
| Lichtstrahl beim Übergang | 0.48 | .45 | fwb1 |
| Unterschiedliche Brechzahlen | 0.73 | .57 | fwb2 |
| Brechung im Alltag | 1.56 | .59 | fwb3 |
| Brechung zum Lot hin | 1.87 | .41 | fwb4 |
| Geradlinigkeit | 0.33 | .43 | fwb5 |
| Plexiglasklotz | 1.39 | .50 | fwb6 |
| Brechung paralleler Lichtstrahlen | 1.93 | .44 | fwb7 |
| Reflexion an der Fensterscheibe | 2.23 | .52 | fwb8 |
| Richtungsänderung des Lichtwegs 1 | 2.18 | .49 | fwb9 |
| Brechungswinkel kleiner als Einfallswinkel | 2.46 | .51 | fwb10 |
| Einfallswinkel und Ausfallwinkel | 2.24 | .37 | fwb11 |
| Vergrößerung des Einfallswinkels | 1.99 | .33 | fwb12 |
| Richtungsänderung des Lichtwegs 2 | 0.40 | .47 | fwb13 |
| Reflexion im Plexiglas | 1.75 | .42 | fwb14 |
| Einfallswinkel und Brechungswinkel | 2.61 | .38 | fwb15 |
| Spiegel im Aquarium | 2.57 | .32 | fwb16 |
| künstliches und natürliches Licht | 1.41 | .47 | fwb17 |
| Brechung an der Kante | 0.94 | .42 | fwb18 |

1. Was können Sie über einen Lichtstrahl beim Übergang von Luft in einen anderen durchsichtigen Stoff (z. B. Glas oder Wasser) sagen?⁷⁶
 - Der Lichtstrahl geht nur bis zum Übergang zum anderen Stoff und hört dann auf.
 - Der Lichtstrahl ändert seine Richtung nicht, sondern verläuft einfach gerade weiter.
 - Der Lichtstrahl reicht bis in die Mitte des anderen Stoffes und bringt diesen zum Leuchten.
 - Der Lichtstrahl ändert seine Richtung, sobald er den anderen Stoff erreicht hat.*

⁷⁶ Die richtige Antwortmöglichkeit wird im Folgenden mit einem Stern (*) markiert.

2. Licht wird an der Wasseroberfläche gebrochen. Wie kann man das erklären?
 - Die Brechungsindizes der Wasseroberfläche und des Wassers sind unterschiedlich.
 - Der Brechungsindex des Lichtes wird an der Wasseroberfläche verändert.
 - Die Brechungsindizes von Luft und Wasser sind gleich.
 - Die Brechungsindizes von Luft und Wasser sind unterschiedlich.*

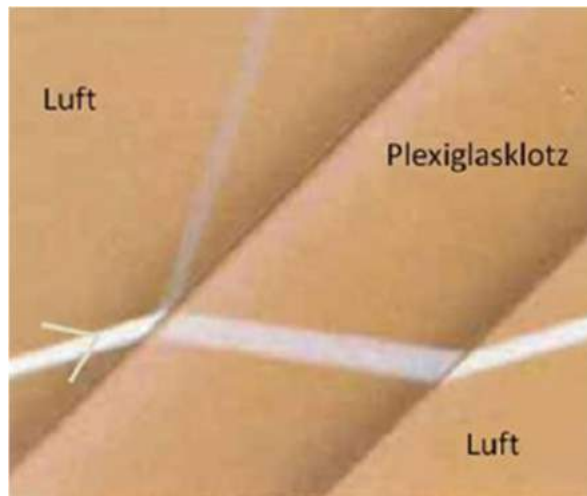
3. Kreuzen Sie an, in welcher Situation Sie das Phänomen der Lichtbrechung im Alltag beobachten können.
 - Ich betrachte mein Spiegelbild im glatten Wasser eines Sees.
 - Ich schaue vom Ufer aus ins klare Wasser und glaube, dass dort alles flach ist.*
 - Beim Skifahren blendet mich der helle Schnee.
 - Beim Sonnenschein unterbricht z. B. ein Baum das Sonnenlicht, sodass er einen Schatten wirft.

4. Welche Aussage ist richtig, wenn Licht von Luft in Plexiglas gelangt?
 - Es wird vollständig reflektiert.
 - Es wird vom Lot weg gebrochen.
 - Es wird weder gebrochen noch reflektiert.
 - Es wird zum Lot hin gebrochen.*

5. Nehmen Sie Stellung zur folgenden Aussage: „Ich glaube nicht, dass sich Licht gradlinig ausbreitet. Leuchtet man nämlich durch einen Plexiglasklotz, ändert sich die Ausbreitungsrichtung des Lichts.“
 - Ich stimme der Aussage zu. Licht besitzt nicht die Eigenschaft, sich gradlinig auszubreiten.
 - Ich stimme der Aussage zu. Trifft Licht auf einen Plexiglasklotz, geht es immer auf geradem Weg hindurch.
 - Ich stimme der Aussage nicht zu. Trifft Licht auf einen Plexiglasklotz, wird es reflektiert.
 - Ich stimme der Aussage nicht zu. Licht breitet sich gradlinig aus. Am Plexiglasklotz wird es zwar gebrochen, danach breitet es sich aber wieder gradlinig aus.*

Anhang

6. Was können Sie über den Lichtweg durch einen planparallelen Plexiglasklotz sagen (siehe Abbildung)?



- Am Übergang von Luft zum Plexiglas wird das Licht zum Teil reflektiert, das übrige Licht verläuft, nachdem es einmal die Richtung geändert hat, immer gradlinig weiter.
 - Das Licht wird komplett am ersten Übergang von Luft zum Plexiglas reflektiert.
 - Da die beiden Grenzflächen parallel zueinander liegen, verläuft das Licht nach dem Verlassen des Plexiglasklotzes wieder in der gleichen Richtung wie vor dem Klotz.*
 - Nur wenn Licht aus der Luft in den Plexiglasklotz hineinleuchtet, ändert sich seine Ausrichtung.
7. Wie verlaufen parallele Lichtstrahlen, nachdem sie an einer Wasseroberfläche gebrochen wurden?
- Sie laufen beim Übergang von Luft in Wasser ineinander.
 - Sie bleiben beim Übergang von Luft in Wasser parallel.*
 - Sie laufen beim Übergang von Luft in Wasser auseinander.
 - Sie werden beim Übergang von Luft in Wasser gedreht.

8. Warum sieht man an einer Fensterscheibe oder einem Schaufenster sein eigenes Spiegelbild?
- An der vom Betrachter abgewandten Fensteroberfläche findet eine Totalreflexion statt, während an der zugewandten Fensteroberfläche das Licht gebrochen wird.
 - An der dem Betrachter zugewandten Fensteroberfläche wird ein Teil des auftreffenden Lichts gebrochen und ein Teil reflektiert, an der abgewandten Seite findet eine Totalreflexion statt.
 - An der dem Betrachter zugewandten Fensteroberfläche findet eine Totalreflexion statt, während an der abgewandten Fensteroberfläche das Licht gebrochen wird.
 - An beiden Fensteroberflächen wird ein Teil des auftreffenden Lichtes gebrochen und ein Teil reflektiert.*
9. Kreuzen Sie an, was Sie unter der „Brechung des Lichts“ verstehen.
- Richtungsänderung des Lichtweges, wenn Licht auf ein anderes Medium trifft.
 - Richtungsänderung des Lichtweges, wenn Licht in ein anderes Medium gelangt.*
 - Ausbreitung des Lichts, ohne eine Richtungsänderung des Lichtweges.
 - Richtungsänderung des Lichtweges, wenn Licht an einem Spiegel umgelenkt wird.
10. Die Aussage „Der Brechungswinkel ist stets kleiner als der Einfallswinkel.“ ist ...
- ... nur dann richtig, wenn Licht von einem optisch dünneren in ein optisch dichteres Medium gelangt.*
 - ... falsch, da Brechungswinkel und Einfallswinkel stets gleich groß sind.
 - ... nur dann richtig, wenn der Einfallswinkel den Grenzwinkel überschreitet, so dass es zur Totalreflexion kommt.
... nur dann richtig, wenn Licht von einem optisch dichteren in ein optisch dünneres Medium gelangt.
11. Beschreiben Sie den Zusammenhang zwischen Einfallswinkel und Ausfallswinkel an einem Spiegel mit einer „Je ..., desto ...“-Formulierung.
- Je größer der Einfallswinkel ist, desto größer ist der Ausfallswinkel.
 - Je kleiner der Einfallswinkel ist, desto größer ist der Ausfallswinkel.
 - Je größer der Einfallswinkel ist, desto kleiner ist der Ausfallswinkel.
 - Je größer der Einfallswinkel ist, desto größer ist der Brechungswinkel.*

Anhang

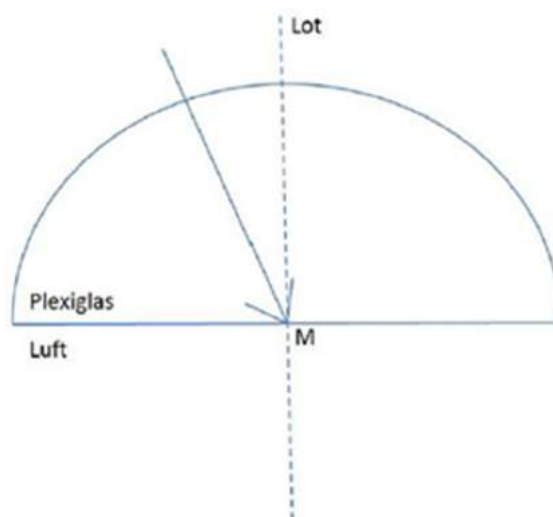
12. Stellen Sie sich vor, Licht strahlt aus Wasser in die Luft. Was passiert, wenn der Einfallswinkel immer weiter vergrößert wird?

- Nach Überschreiten des Grenzwinkels kommt es zur Totalreflexion.*
- Das einfallende Licht wird gebrochen, bis es parallel zur Wasseroberfläche verläuft.
- Je größer der Einfallswinkel wird, desto kleiner wird der Brechungswinkel.
- Das Licht wird zum Lot hin gebrochen.

13. Kreuzen Sie an, was Sie unter der „Brechung des Lichts“ verstehen.

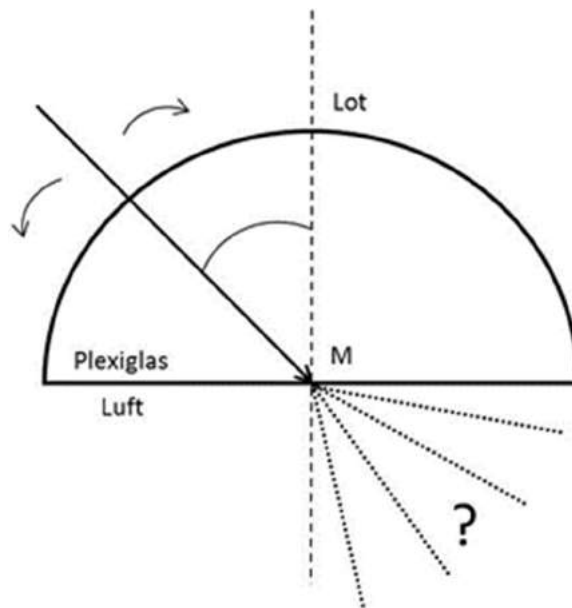
- Richtungsänderung des Lichtweges, wenn Licht auf ein nicht durchsichtiges Medium trifft.
- Ausbreitung des Lichts, ohne eine Richtungsänderung des Lichtweges.
- Richtungsänderung des Lichtweges, wenn Licht in ein durchsichtiges Medium gelangt.*
- Richtungsänderung des Lichtweges, wenn Licht an einem Spiegel umgelenkt wird.

14. Welche Beobachtung können Sie machen, wenn Sie mit einem Lichtstrahl durch den Mittelpunkt des halbrunden Plexiglasses leuchten (siehe Skizze)?



- Das Licht wird zum Teil am Mittelpunkt nach unten reflektiert.
- Das Licht wird nicht reflektiert.
- Das Licht wird zum Teil am Mittelpunkt nach oben reflektiert.*
- Das Licht wird zum Ausgangspunkt reflektiert.

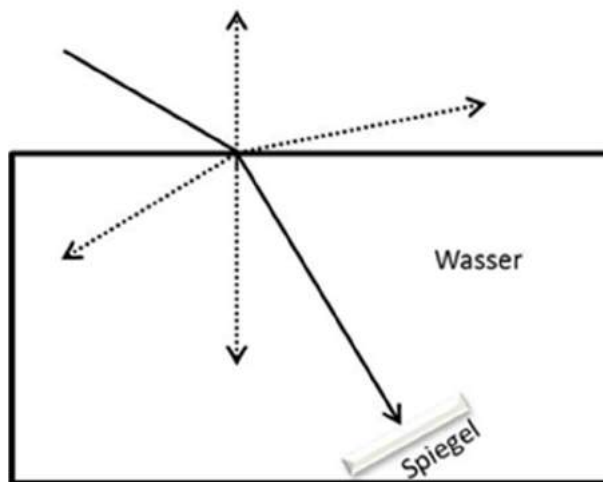
15. Die Skizze zeigt einen halbrunden Plexiglasblock. Welche Aussage über den Zusammenhang von Einfallswinkel und Brechungswinkel ist richtig?



- Je kleiner der Einfallswinkel, desto größer der Brechungswinkel.
- Der Einfallswinkel und der Brechungswinkel sind immer gleich groß.
- Je größer der Einfallswinkel, desto kleiner der Brechungswinkel.
- Je größer der Einfallswinkel, desto größer der Brechungswinkel.*

Anhang

16. Wie verläuft ein Lichtstrahl beim Übergang von Luft in ein Aquarium, der dann von einem am Boden angebrachten Spiegel zurück reflektiert wird?

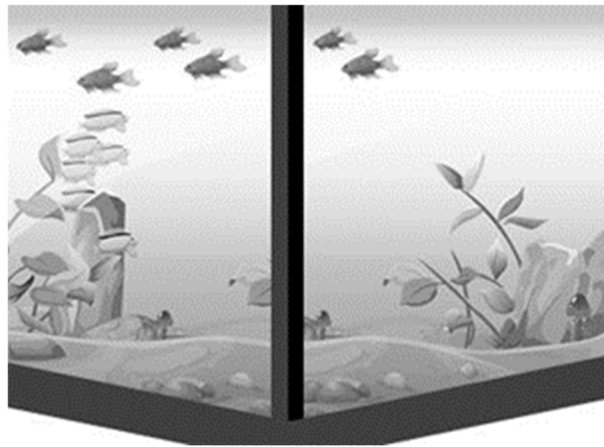


- Er wird an der Wasseroberfläche wieder gebrochen und verläuft dann senkrecht zur Wasseroberfläche.
- Er wird an der Wasseroberfläche zurück gebrochen und verläuft dann identisch zum Ursprungsstrahl.*
- Er wird an der Wasseroberfläche wieder gebrochen und verläuft dann im rechten Winkel zum Ursprungsstrahl.
- Er wird an der Wasseroberfläche nicht gebrochen und verläuft in der Luft geradlinig weiter.

17. Ein Lichtbündel aus einer Taschenlampe und ein von der Sonne kommendes Lichtbündel werden in einem Versuchsaufbau auf einen Glaskörper fallen gelassen. Was passiert mit den beiden Lichtbündeln aus künstlichem und natürlichem Licht?

- Beide Lichtbündel werden gleich stark gebrochen.*
- Das künstliche Lichtbündel wird stärker als das natürliche Lichtbündel gebrochen.
- Das natürliche Lichtbündel wird stärker als das künstliche Lichtbündel gebrochen.
- Das künstliche Lichtbündel wird gebrochen, das natürliche Lichtbündel wird nicht gebrochen.

18. Sie möchten die Dinge im Aquarium zählen. Dabei schauen Sie auf die Kante des Beckens (siehe Abbildung). Welcher Aussage stimmen Sie zu?



- Im Becken befinden sich acht dunkle Fische, aber wegen der Lichtbrechung sieht man nur sechs.
- Die Lichtbrechung an der Glaskante des Aquariums täuscht uns – es sind tatsächlich nur zwei Pilze, vier dunkle Fische sowie einige helle Fische.*
- Im Becken befinden sich drei Pilze sowie sechs dunkle und einige helle Fische.
- Zwei der dunklen Fische spiegeln sich in der Wand des Aquariums, weswegen es so aussieht, als wären es sechs dunkle Fische.

Skalen zu Selbstwirksamkeitserwartungen

Tabelle 36: Skala zur mathematischen SWE (mse) nach Bescherer (2004)

| Subskala | Item | Name |
|------------------|--|-------|
| Prozessfähigkeit | mathematische Gleichungen aufstellen | msep1 |
| | komplexe Probleme lösen | msep2 |
| | Lösungswege begründen | msep3 |
| Handwerk | mathematische Ausdrücke umformen | mseh1 |
| | Formeln verwenden | mseh2 |
| | Ergebnisse selbstständig überprüfen | mseh3 |
| Visualisierung | geometrische Konstruktionen anfertigen | msev1 |
| | elementarisierte Darstellungen verstehen | msev2 |
| | Ergebnisse graphisch veranschaulichen | msev3 |

Anmerkung. Die Teilnehmenden wurden gebeten, ihre Fähigkeiten und Kenntnisse in den folgenden Gebieten von (1) *sehr schlecht* bis (5) *sehr gut* einzustufen.

Tabelle 37: Skala zur experimentierbezogenen SWE (ese) nach Schroedter und Körner (2012)

| Item | Name |
|---|------|
| Obwohl man für ein ^a Experiment viele Geräte benötigt, glaube ich, dass es mir gelingt. | ese1 |
| Selbst wenn in der Versuchsbeschreibung ^b keine Zeichnungen enthalten sind, glaube ich, dass ich ein Experiment schaffe. | ese2 |
| Selbst wenn der Betreuer ^c ein Experiment vorher nicht vorführt, schaffe ich es. | ese3 |
| Auch wenn ich besonders genau arbeiten muss, gelingt mir ein Experiment. | ese4 |
| Ich schaffe ein Experiment sogar dann, wenn ich während des Experiments nicht von dem Betreuer unterstützt werde. | ese5 |
| Obwohl ich wenig Zeit zum Experimentieren bekomme, schaffe ich es. | ese6 |
| Ich schaffe ein Experiment, auch wenn ich dabei nervös bin. | ese7 |
| Ich bin überzeugt, dass ich im Allgemeinen sehr gut experimentieren kann. | ese8 |

Anmerkung. Die Teilnehmenden wurden gebeten anzugeben, in welchem Ausmaß sie den folgenden Aussagen von (1) *stimme überhaupt nicht zu* bis (5) *stimme voll und ganz zu* zustimmen.

a. Im Original wird von „dem“ Experiment gesprochen, während im untersuchten Praktikumsversuch die durchzuführenden Experimente nicht vorgestellt wurden.

b. Im Original wird von der „Experimentieranleitung“ gesprochen, während dem untersuchten Praktikumsversuch eine Versuchsbeschreibung zugrunde liegt.

c. Im Original wird von der „Lehrkraft“ gesprochen, während der untersuchte Praktikumsversuch von einer männlichen Person betreut wurde.

Tabelle 38: Verkürzte Skala zur *computerbezogenen SWE* (cse) mit Items zur *Computerangst* (can) und *Computer beim Lernen* (cle) nach Spannagel und Bescherer (2012, zitiert nach Mézes, 2016, S. 108f)

| Item | Name |
|--|------|
| Ich kann normalerweise mit den meisten Schwierigkeiten umgehen, auf die ich während der Benutzung eines Computers stoße. | cse1 |
| Ich bin sehr unsicher über meine Fähigkeiten im Umgang mit Computern. ^a | cse2 |
| Ich finde es schwierig, Computer dazu zu bringen, das zu tun, was ich von ihnen will. ^a | cse3 |
| Ich halte mich selbst für einen geschickten Computernutzer. | cse4 |
| Computerbegriffe verwirren mich. ^a | cse5 |
| Wenn ich einen Computer verwende, dann scheinen manchmal Dinge einfach so zu passieren, und ich weiß nicht warum. ^a | cse6 |
| Was Computer angeht, halte ich mich selbst für nicht sehr kompetent. ^a | cse7 |
| Computer machen mir Angst. | can1 |
| Wenn ich einen Computer benutze, dann befürchte ich, dass ich eine falsche Taste drücken und ihn beschädigen könnte. | can2 |
| Das Verwenden von Computern macht Lernen interessanter. | cle1 |
| Computer sind gute Hilfsmittel beim Lernen. | cle2 |
| Einige Computerprogramme machen Lernen eindeutig einfacher. | cle3 |

Anmerkung. Die Teilnehmenden wurden gebeten anzugeben, in welchem Ausmaß sie den folgenden Aussagen von (1) *stimme überhaupt nicht zu* bis (5) *stimme voll und ganz zu* zustimmen.

a. Das Item wurde bei der Auswertung umgepolt.

Ziele des Modells zur Brechung

Tabelle 39: Kategorien und Beschreibungen der Ziele bei der Arbeit mit dem dynamischen Modell zur Brechung an der Halbkreisscheibe

| Kategorie | Beschreibung | Name |
|---|--|-------------------------------------|
| Bestandteile des Modells variieren | Breite der Halbkreisscheibe über den Punkt B verändern | mVar _B |
| | Eintrittspunkt P verschieben | mVar _P |
| | Lichtquelle Q verschieben (→ Einfallswinkel α variieren) | mVar _{α} |
| | Verlängerung des Brechungswinkels beim Eintritt V einblenden | mVar _V |
| | Winkelscheibe W einblenden | mVar _W |
| | Brechungsindex der Halbkreisscheibe n_2 variieren | mVar _{n} |
| Grenzen des Modells untersuchen | P an den oberen oder unteren Rand der Halbkreisscheibe führen | mRan _P |
| | n_2 kleiner als 1,2 oder größer als 1,8 einstellen | mRan _{n} |
| | B kleiner als 4 oder größer als 8 einstellen | mRan _B |
| | α größer als 80° einstellen | mRan _{α} |
| experimentierbezogene Einstellungen vornehmen | α variieren, während sich P in der Mitte der Halbkreisscheibe befindet (→ Brechung beim Austritt vermeiden) | mEin _{PM} |
| | P variieren, während die Verlängerung eingeschaltet ist (→ Einfluss von P auf die Brechung beim Austritt untersuchen) | mEin _V |
| | P oder α variieren, während sich die Mitte der Winkelscheibe in der Mitte der Halbkreisscheibe befindet (→ Voraussetzung für die Messung der Brechung beim Eintritt herstellen) | mEin _{WM} |
| | α variieren, während sich P in der Mitte der Winkelscheibe befindet (→ α mithilfe der Winkelscheibe messen) | mEin _{WP} |

Hypothesen zur Brechung

Tabelle 40: Kategorien und Beschreibungen der Hypothesen bei der Arbeit mit dem dynamischen Modell zur Brechung an der Halbkreisscheibe

| Kategorie | Beschreibung | Beispiel | Name |
|---------------------------------------|--|---|------|
| Brechung beim Eintritt | Beim Eintritt findet Brechung statt. | <i>Der Lichtstrahl wird beim Eintritt an dem Halbkreiskörper gebrochen, [...]</i> | H1 |
| Brechung beim Austritt | Beim Austritt findet Brechung statt. | <i>Ein Teil des Lichts wird aber auch an der Außenfläche [etwas/einmal] gebrochen.</i> | H2 |
| Richtung der Brechung beim Eintritt | Beim Eintritt findet Brechung zum Lot statt. | <i>Beim Übergang von Luft zu Plexiglas findet eine Brechung zum Lot statt.</i> | H3 |
| Richtung der Brechung beim Austritt | Beim Austritt findet Brechung vom Lot weg statt. | <i>Licht wird von dichteren zum dünneren Medium vom Lot weggebrochen.</i> | H4 |
| Brechungsindex | Einfluss der Brechungsindizes auf die Brechung | <i>[Das Licht wird] gebrochen, da unterschiedliche Brechungsindizes [vorliegen].</i> | H5 |
| Geradlinigkeit | Geradlinige Ausbreitung des Lichts | <i>Das Licht breitet sich geradlinig bis zur ebenen Seite des Halbkreiskörpers aus.</i> | H6 |
| Winkelbeziehungen | Diverse Zusammenhänge von Einfallswinkel und Brechungswinkeln | <i>Je größer α_1, desto größer β_2.</i> | H7 |
| Keine Brechung beim Eintritt | Verhalten des Lichts, das senkrecht auf die Halbkreisscheibe trifft. | <i>[Es findet] keine Brechung statt [...], wenn [das Licht] senkrecht draufstrahlt.</i> | H8 |
| Keine Brechung beim Ein- und Austritt | Verhalten des Lichts, das auf die Mitte und senkrecht auf die Halbkreisscheibe trifft. | <i>Trifft das Licht in einem 90° Winkel auf die Mitte der Vorderseite, wird es an der Rückseite nicht mehr gebrochen.</i> | H9 |
| Einfluss der Größe | Einfluss der Größe der Halbkreisscheibe | <i>Die Größe des Halbkreiskörpers hat keinen Einfluss auf die Lichtbrechung.</i> | H10 |
| Mitte der Halbkreisscheibe | Verhalten des Lichts, das auf die Mitte der Halbkreisscheibe trifft. | <i>Wenn der Strahl genau durch die Mitte des Halbkreiskörpers verläuft, dann wird er nur einmal gebrochen (beim Eintreten).</i> | H11 |

Anhang

| | | | |
|----------------------------|---|--|-----|
| Lot senkrecht auf Tangente | Beschreibung des Lots als Senkrechte auf der Tangente des Kreises | <i>[...] jeder Lichtstrahl, der durch den Mittelpunkt des runden Glaskörpers verläuft, [ist] gleichzeitig die Senkrechte [...], an dem der Lichtstrahl gebrochen werden soll.</i> | H12 |
| Winkelscheibe | Einsatz der Winkelscheibe | <i>Mithilfe der Winkelscheibe lässt sich der Brechungswinkel experimentell bestimmen.</i> | H13 |
| Linseffekt | Eigenschaft der Halbreisscheibe als Linse | <i>Im bauchigen Teil wird das Licht wahrscheinlich so gebrochen, dass es dabei fokussiert wird und dieser Teil des Körpers wie eine Sammellinse funktionieren müsste, weshalb der Strahlengang am Ende schmaler ist im Vergleich zum Anfang.</i> | H14 |
| Totalreflexion | Auftreten einer Totalreflexion | <i>In einem Fall wurde β_2 so groß, dass der Strahl nicht mehr aus der Halbkugel austrat.</i> | H15 |

Tabelle 41: Formulierten Hypothesen der Teilnehmenden und zugeordnete Kategorien

| ID Hypothese | Kategorie |
|--|-----------|
| 1 <i>Sind Brechzahlen von Medien gleich, so ist der Weg identisch mit dem ohne Mediengrenzen. Je höher die Differenz der Brechzahlen, desto höher die Ablenkung. In einem Fall wurde β_2 so groß, dass der Strahl nicht mehr aus der Halbkugel austrat.</i> | H5 |
| | H15 |
| 2 <i>Punkt P verschieben: - wenn der Strahl genau durch die Mitte des Halbkreiskörpers verläuft, dann wird er nur einmal gebrochen (beim Eintreten). - wenn der Strahl nicht genau durch die Mitte des Körpers verläuft, dann wird er beim Übergang Luft zu Halbkreiskörper (zum Lot hin) und beim Übergang Halbkreiskörper Luft (vom Lot weg) gebrochen. Quelle Q verschieben: - wenn der Einfallswinkel α_1 klein ist, ist der Einfallswinkel α_2 größer und umgekehrt. - der Ausfallswinkel β_1 ist kleiner als der Einfallswinkel, da der Lichtstrahl zum Lot hin gebrochen wird. - der Ausfallswinkel β_2 ist größer als der Einfallswinkel α_2, da der Strahl vom Lot weggebrochen wird. - bei einem kleineren Halbkreiskörper bleibt der Ausfallswinkel gleich groß, wie bei einem größeren Körper. - mit höherer Brechzahl des Halbkreiskörpers, ist der Ausfallswinkel β_2 größer.</i> | H1 |
| | H2 |
| | H3 |
| | H4 |
| | H5 |
| | H11 |
| 3 <i>Das Licht durch einen Halbkreiskörper wird 2x gebrochen.</i> | H1 |
| | H2 |
| 4 <i>Bis auf Spezialfälle findet an beiden Übergängen eine Brechung statt. Je nach Winkel kann dabei eine Totalreflexion oder keine Brechung stattfinden.</i> | H1 |
| | H2 |
| | H8 |
| | H15 |
| 5 <i>Die Größe des Halbkreiskörpers hat keinen Einfluss auf die Lichtbrechung. Je größer der Einfallswinkel, desto stärker wird das Licht gebrochen.</i> | H7 |
| | H10 |
| 6 <i>Gar keinen [Einfluss der Größe] Wenn $\alpha_1 > \alpha_2$, dann β_1 klein -> klare 2x Brechung</i> | H1 |
| | H2 |
| | H10 |
| 7 <i>Licht wird zwei Mal gebrochen. Je größer α_1, desto größer β_2.</i> | H1 |
| | H2 |
| | H7 |
| 8 <i>Beim Übergang von Luft zu Plexiglas findet eine Brechung zum Lot statt. Mithilfe der Winkelscheibe lässt sich der Brechungswinkel experimentell bestimmen. Bei Übergang von Plexiglas zu Luft findet eine Brechung vom Lot weg statt. Sie verläuft wie bei einer Sammellinse.</i> | H1 |
| | H2 |
| | H3 |
| | H4 |
| | H13 |
| | H14 |
| 9 <i>Der Lichtweg durch einen Halbkreiskörper verläuft immer so, dass α_2 und β_1 einander entsprechen -> wo keine Brechung stattfinden -> immer, wenn der senkrecht drauf strahlt.</i> | H8 |

Anhang

| | | |
|----|--|-----------------------------|
| 10 | Trifft das Licht auf den Halbkreismittelpunkt, wird das Licht beim Austritt aus dem Körper nicht gebrochen, da es senkrecht auf die Fläche trifft. | H11 |
| | Am Rand des Plexiglasklotzes macht sich die zweifache Brechung besonders bemerkbar, da die Austrittsfläche im Vergleich zur Eintrittsfläche viel stärker geneigt ist. | H14 |
| 11 | Der Lichtstrahl wird beim Eintritt an dem Halbkreiskörper gebrochen, da unterschiedliche Brechungsindizes. Beim Austritt des Körpers (dicht -> dünn) findet bei Grenzwinkel $\alpha=90^\circ$ eine Totalreflexion statt. Ein Teil des Lichts wird aber auch an der Außenfläche [etwas/einmal] gebrochen. | H1 H2 H5 H15 |
| 12 | Licht wird wie beim Eintritt in einen geraden Körper gebrochen nur, dass beim Kreis die Tangente ausschlaggebend ist, um das Lot einzuzeichnen. Licht wird von dichteren zum dünneren Medium vom Lot weggebrochen. | H1 H2 H4 H12 |
| 13 | Licht verläuft vom optisch dünnen in das optisch dichte Medium und wird dort zum Lot hin gebrochen. Dieser Strahl trifft dann auf dem Halbkreis (Glasscheibe) wieder gebrochen. Diesmal vom Lot weg, da das Licht vom opt. dichten ins opt. dünne verläuft. Je stärker der Brechungsindex des Glases wird, umso besser erkennt man die Brechung. | H1 H2 H3 H4 H5 |
| 14 | Lichtweg wird zentrisch gestreckt -> linear abhängig von Größe des Körpers. - Wenn Einfallswinkel zu groß wird -> Brechung an Plexiglas findet nicht statt, da Einfallswinkel zu groß wird. | H15 |
| 15 | Wenn das Licht senkrecht auf den Halbkreiskörper trifft, ist die geometrische Weglänge am Minimum. Sobald der Einfallswinkel vergrößert wird, nimmt das Licht nicht den kürzesten, sondern den schnellsten Weg, somit ist die optische Weglänge am Minimum. | |
| 16 | Trifft das Licht am Rand auf den Halbkreiskörper, verlässt es ihn nicht mehr an der Rückseite. - Trifft das Licht in einen 90° Winkel auf die Mitte der Vorderseite, wird es an der Rückseite nicht mehr gebrochen. | H8 H9 H15 |
| 17 | Sobald der Lichtstrahl auf die ebene Grenzfläche des Körpers trifft wird er entsprechend der Brechzahl des Mediums gebrochen. Beim Austritt des Strahls an der kreisförmigen Grenzfläche des Mediums wird das Licht erneut zum Lot hin gebrochen. | H1 H2 H5 |
| 18 | Das Licht bereitet sich geradlinig bis zur ebenen Seite des Halbkreiskörpers aus. Dort wird es zum Lot hin gebrochen, da dessen optische Dichte größer als die der Luft ist. In Abhängigkeit vom Eintrittspunkt P ändert sich der Austrittswinkel, aufgrund der kreisförmigen Form des Halbkreiskörpers. | H1 H3 H5 H6 H14 |

| | |
|---|-----|
| 19 Licht fällt von einem op. Dünneren ins op. Dichteres Medium & wird dabei gebrochen, zum Lot hin gebrochen. Anschließend wird es wieder gebrochen, vom Lot weggebrochen. Breitet sich geradlinig weiter durch. | H1 |
| | H2 |
| | H3 |
| | H4 |
| | H5 |
| | H6 |
| 20 Strahlt die Lichtquelle senkrecht auf die Eintrittsfläche des Halbkreiskörpers über den (Mittel) Punkt P ein, so verläuft das Licht beim Ein und Austreten geradlinig. | H8 |
| | H9 |
| 21 Je nachdem, wie der Eintrittswinkel verändert wird, verändert sich auch der Austrittswinkel. Je nachdem, wie die Brechzahl des Mediums verändert wird, verändert sich auch die Richtungsänderung. | H5 |
| 22 Ändert sich der Einfallswinkel, so ändert sich auch der Ausfallswinkel. Ändert man noch die Brechzahl, so ändert sich auch die Richtungsänderung. | H5 |
| 23 Je kleiner der Körper, desto größer der Unterschied zwischen β_1 und β_2 . Für große Körper nähert sich der Austrittswinkel β_1 sehr stark an. Besonders an den Rändern, dort ist β_2 prägnant, bis es zur Totalreflexion kommt. | H14 |
| | H15 |
| 24 Der Lichtstrahl trifft die flache Seite des Halbkreiskörpers, dabei wird zum Lot hin gebrochen, der Strahl verläuft weiter zum bauchigen Teil und wird dort zum Lot gebrochen. Im bauchigen Teil wird das Licht wahrscheinlich so gebrochen, dass es dabei fokussiert wird und dieser Teil des Körpers wie eine Sammellinse funktionieren müsste, weshalb der Strahlengang am Ende schmaler ist im Vergleich zum Anfang. | H1 |
| | H2 |
| | H3 |
| | H4 |
| | H14 |
| 25 Man kann nur dann den Brechungsindex von Glas bestimmen, wenn man mit dem Laser durch den Mittelpunkt des Halbkreiskörpers leuchtet. Denn das ist die besondere geometrische Eigenschaft des Kreises. Jedes Lot zeigt zum Mittelpunkt. Daher ist der zweite Eintrittswinkel immer 0° . | H11 |
| 26 Man kann mit dem Halbkreiskörper sehr gut den Austrittswinkel messen, unter dem ein Lichtstrahl in Abhängigkeit von einem Eintrittswinkel zur Senkrechten austritt. Dann kann man die Proportionalitätskonstante herausbekommen, welche der Brechzahl des Glases entspricht. Dies ist aber nur möglich, wenn man mit dem Licht durch den Mittelpunkt des Halbkreises leuchtet, denn der Kreis hat die besondere geometrische Eigenschaft, dass der Lichtstrahl beim Austritt aus dem Glaskörper nicht noch einmal gebrochen wird und sich der Lichtweg nicht verändert. Dies liegt daran, dass jeder Lichtstrahl, der durch den Mittelpunkt des runden Glaskörpers verläuft, gleichzeitig die Senkrechte ist, an dem der Lichtstrahl gebrochen werden soll, sodass ein α_2 von 0 Grad zu einem β_2 von 0 führt. Hierdurch wird der Lichtstrahl nicht noch einmal abgelenkt. | H11 |
| | H12 |

Anhang

| | |
|---|-----|
| 27 Snelliussches Brechungsgesetz: $n_1 \cdot \sin(\alpha) = n_2 \cdot \sin(\beta)$. Wenn der Einfallswinkel gleich Null entspricht, so wird das Licht nicht gebrochen. Je nach Medium wird das Licht entweder zum Lot oder weg vom Lot gebrochen. | H1 |
| | H3 |
| | H8 |
| 28 Ist der Einfallswinkel $= 0^\circ$, so wird das Licht auch nicht gebrochen, da nach dem Snelliusschen Brechungsgesetz gilt: $\sin(\alpha) \cdot n_1 = \sin(\beta) \cdot n_2$. Die Linke Seite der Gleichung ist demnach null, so dass auch $\beta = 0$ ist. | H8 |
| 29 -Wenn der Strahl senkrecht auf beide Grenzflächen (Luft-Plexiglas und Plexiglas-Luft) trifft so wird er nicht gebrochen. - Wenn der Strahl nicht senkrecht auf das Plexiglas trifft, wird er zuerst zum Lot hin gebrochen und beim Übergang von Plexiglas zu Luft vom Lot weg gebrochen. | H1 |
| | H2 |
| | H3 |
| | H4 |
| | H8 |
| 30 Je größer der Weg ist, welchen das Licht durch den Halbkreiskörper zurücklegt, desto kleiner ist der Brechungswinkel beim Austritt aus dem Halbkreiskörper. Die Eintrittsstelle des Lichtes beeinflusst den Brechungswinkel beim Austritt des Lichts aus dem Halbkreiskörper. Je weiter außen die Eintrittsstelle des Lichtes ist, desto größer ist der Brechungswinkel. Dies lässt sich auch mit der ersten aufgestellten Hypothese widerlegen. | H9 |
| | H11 |
| 31 Fällt das Licht von der Quelle genau durch den Mittelpunkt des Halbkreiskörpers, wird er beim Verlassen des Halbkreiskörpers nicht nochmal gebrochen. Verschiebt man den Eintrittspunkt des Lichtes zu einer Seite, so entsteht ein Winkelbereich für das gebrochene Licht im Halbkreiskörper, sodass an der "Rückseite" eine Totalreflexion stattfindet. Außerdem ändert sich die Brechungsrichtung des Lichtes an der Rückseite des Halbkreiskörpers, sobald der gebrochene Lichtstrahl von der Vorderseite die Mitte der Wölbung überschreitet. | H11 |
| | H14 |
| | H15 |
| 32 Der Lichtstrahl wird jeweils an den Grenzen zwischen den beiden Medien gebrochen, es sei denn der Lichtstrahl geht genau durch den Mittelpunkt des Halbkreiskörpers. Ebenfalls ist zu sehen das der Eintrittswinkel stets größer als der Eintrittswinkel ist. Wenn der Einfallspunkt nahe an den Enden des Halbkreiskörpers gebrochen wird entsteht durch den Grenzwinkel eine Totalreflexion. | H1 |
| | H2 |
| | H11 |
| | H15 |
| 33 Das Licht wird jeweils beim Eintritt wie auch beim Austritt aus dem Glaskörper gebrochen. Von Luft in Glas wird das Licht zum Lot hin gebrochen. Von Glas in Luft wird das Licht vom Lot weg gebrochen und verläuft danach geradlinig weiter. Ab dem Grenzwinkel findet eine Totalreflexion statt. | H1 |
| | H2 |
| | H3 |
| | H4 |
| | H6 |
| | H15 |

| | |
|---|-----|
| 34 <i>Der Lichtweg wird länger, da er zunächst geradlinig durch einen Halbkreis verläuft, bevor dieser abermals an der runden Grenzfläche gebrochen wird. Der Brechungsstrahl muss senkrecht auf die runde Grenzfläche treffen. Oberhalb und unterhalb von der optischen Achse ist die Brechung am größten. Also da wo die Tangente am Halbkreis einen großen Winkel hat zur Tangente, die genau senkrecht zur optischen Achse steht.</i> | H2 |
| | H11 |
| | H14 |
| | |
| 35 - tritt das Licht senkrecht durch den Mittelpunkt des Kreises ein, so breitet es sich ungebrochen und gradlinig weiter und verlässt das Plexiglas auch auf dieser Weise weiter. - tritt das Licht mit dem Winkel α durch den Mittelpunkt des Kreises ein, so breitet es sich zum Lot hin gebrochen und gradlinig weiter. Beim Verlassen, des Plexiglasses wird das Licht vom Lot weg gebrochen, steht senkrecht zur Oberfläche und breitet sich ebenfalls gradlinig weiter aus. - tritt das Licht mit dem Winkel A durch einen anderen Punkt des Kreises ein, so breitet es sich zum Lot hin gebrochen und gradlinig weiter. Beim Verlassen, des Plexiglasses wird das Licht vom Lot weg gebrochen und breitet sich ebenfalls gradlinig weiter aus. | H1 |
| | H2 |
| | H3 |
| | H4 |
| | H6 |
| | H8 |
| | H9 |
| | H11 |
| | |
| 36 <i>Das Licht wird insgesamt 2 mal gebrochen, an dem Eintritt und beim Austritt, durch die Kreisform verändert sich die gesamte Ausbreitung des Lichtwegs.</i> | H1 |
| | H2 |
| 37 <i>Beim Eintritt in den flachen Teil des Körpers wird der Lichtstrahl zum Lot hin gebrochen. Beim Austritt am runden Teil wird es vom Lot weg gebrochen. Dabei spielt die Größe nur beim Austritt, also dem runden Teil, eine Rolle. Je größer der Körper und die Rundung, umso kleiner der Brechungswinkel. Mit einer Winkelscheibe lässt sich der Brechungswinkel messen, wenn man sie unter den Glaskörper legt.</i> | H1 |
| | H2 |
| | H3 |
| | H4 |
| | H13 |
| 38 - <i>Der Lichtweg im Halbkreiskörper wird länger, wenn der Halbkreiskörper größer wird. - Wenn man das Licht senkrecht zur Halbkreiskörper hineinleuchtet, wird das Licht zunächst nicht gebrochen. Erst beim Übergang zwischen Glas und Luft (2. Brechung), erkennt man eine Brechung.</i> | H2 |
| | H8 |
| 39 <i>Man kann durch dieses Modell an einem Halbkreiskörper veranschaulichen die Zusammenhang zwischen Eintritt und Austritt Richtung des Lichtes. Fällt Licht senkrecht, erfolgt keine Brechung mehr. Es kann die Brechungswinkel im Vergleich mit Einfallswinkel in verschiedenen Medien beobachtet werden.</i> | H1 |
| | H2 |
| | H5 |
| | H8 |
| 40 <i>Je größer der Halbkreis, desto länger wird der Lichtweg. Wenn der Lichtstrahl durch den Mittelpunkt geht, macht sich die zweite Brechung beim Austritt nicht bemerkbar. Je weiter weg die Eintrittsstelle vom Mittelpunkt ist, desto größer wird die zweifache Brechung.</i> | H11 |
| | H14 |

| | |
|---|-----|
| 41 Das Medium, in welches das Licht eintritt, ist ein optisch dickeres | H1 |
| Medium als Luft. Je dichter dieses wird, desto stärker ist die Brechung. | H2 |
| Tritt Licht ins Medium, so wird das Licht zum Lot hin gebrochen. Tritt es | H3 |
| wieder aus, so wird das Licht wieder vom Lot weg gebrochen. Trifft das | H4 |
| Licht jedoch genau auf den Mittelpunkt des Halbkreiskörpers (Mittelpunkt | H5 |
| von der langen Seite ausgehend), so haben wir nur eine Brechung, | H10 |
| nämlich die von Luft zum Halbkreiskörper. Die letzte Brechung entfällt | H11 |
| dabei. Diese entfällt ebenfalls, wenn sich das Licht sich dem Lot sehr | H15 |
| nähert oder vom Lot sehr weit entfernt ist. Dort wird das Licht so | |
| gebrochen, dass kein Licht mehr austritt (Totalreflexion). Die Größe des | |
| Halbkreiskörpers hat insoweit Einfluss, dass die Fläche kleiner ist und | |
| weniger verschiedene Lichtwege zulässt. Unter gleichem Winkel ist die | |
| Brechung jedoch identisch. | |

Motivation bei der Arbeit mit dem Modell

Tabelle 42: Kurzskala intrinsischer Motivation (kim) nach Wilde et al. (2009)

| Subskala | Item | Name |
|----------------------------|---|------|
| Interesse/Vergnügen | Die Arbeit mit den Modellen hat mir Spaß gemacht. | imi1 |
| | Ich fand die Arbeit mit den Modellen interessant. | imi2 |
| | Die Arbeit mit den Modellen war unterhaltsam. | imi3 |
| wahrgenommene Kompetenz | Mit meiner Leistung bei der Arbeit mit den Modellen bin ich zufrieden. | imk1 |
| | Bei der Arbeit mit den Modellen stellte ich mich geschickt an. | imk2 |
| | Ich glaube, ich war bei der Arbeit mit den Modellen ziemlich gut. | imk3 |
| wahrgenommene Wahlfreiheit | Ich konnte die Arbeit mit den Modellen selbst steuern. | imw1 |
| | Bei der Arbeit mit den Modellen konnte ich wählen, wie ich es mache. | imw2 |
| | Bei der Arbeit mit den Modellen konnte ich so vorgehen, wie ich es wollte. | imw3 |
| Druck/Anspannung | Bei der Arbeit mit den Modellen fühlte ich mich unter Druck. ^a | imd1 |
| | Bei der Arbeit mit den Modellen fühlte ich mich angespannt. ^a | imd2 |
| | Ich hatte Bedenken, ob ich die Arbeit mit den Modellen gut hinbekomme. ^a | imd3 |

Anmerkung. Die Teilnehmenden wurden gebeten anzugeben, in welchem Ausmaß sie den folgenden Aussagen von (1) *stimme überhaupt nicht* zu bis (5) *stimme voll und ganz zu* zustimmen.

a. Das Item wurde bei der Zusammenfassung der Items zur Kurzskala intrinsischer Motivation (kim) umgepolt.

Anhang

Tabelle 43: Kategorien und Beschreibungen der positiven Motivationsaspekte bei der Arbeit mit einem dynamischen Modell

| Kategorie | Beschreibung | Beispiel |
|--|---|--|
| selbstbestimmte Exploration ^{a/b/c} | Möglichkeit, Größen zu variieren, eigenständig Zusammenhängen zu erforschen, Dinge auszuprobieren oder mit dem Modell zu experimentieren. | <i>Ich finde das selbstbestimmte Vorgehen an diesen Modellen interessant.</i> |
| Elementarisierung und Visualisierung ^{a/b} | Elementarisierte, bildliche Darstellung und Veranschaulichung physikalischer Zusammenhänge | <i>[...] so wird das Ganze elementarisiert und verbildlicht.</i> |
| Modellierung verschiedener Fälle ^{a/b/c} | Möglichkeit, bestimmte Einstellungen vorzunehmen, um viele verschiedene Situationen bzw. Grenz- und Spezialfälle zu modellieren. | <i>Ich finde es interessant, dass man durch die einfache Bedienung mehrere Beobachtungen gleichzeitig machen kann.</i> |
| Abwechslung ^a | Alternative Art des Lehrens und Lernens der Physik | <i>Da ich noch sehr wenig mit der Arbeit mit Modellen vertraut bin, empfand ich sie als sehr abwechslungsreich.</i> |
| Überprüfung bestehender Vorstellungen ^{a/b} | Möglichkeit, bestimmte Ideen, Hypothesen oder Zusammenhänge zu untersuchen und zu überprüfen. | <i>[...] mithilfe von den angezeigten Werten konnten diese Zusammenhänge auch bestätigt werden.</i> |
| Aufbau neuer Vorstellungen ^{a/b} | Möglichkeit, zugrundeliegenden Konzepte zu verstehen und sich neue Erkenntnisse und Zusammenhänge zu erschließen. | <i>[...] sich Zusammenhänge selbst erschließen.</i> |
| Lernen mit digitalen Medien ^a | Interesse und Spaß am Lernen mit dem Computer oder der DGS GeoGebra | <i>Zudem arbeite ich gerne mit dem Rechner, weswegen mir diese Art der Arbeit besonders gut gefällt.</i> |
| Benutzerfreundlichkeit ^a | Einfachheit der Durchführung und Bedienung des Modells | <i>[...] einfache Bedienung [...]</i> |

| | | |
|--|--|---|
| übersichtliche Gestaltung des Modells ^a | Vorteilhafte Darstellung und Gestaltung des Modells | <i>Die Vielseitigkeit und doch Einfachheit des Aufbaus.</i> |
| vollständige Bearbeitung ^b | Bearbeitung aller Aufgaben und der gestellten Ziele | <i>Wir haben alle Aufgaben bearbeitet [...]</i> |
| in der Lernumgebung navigieren ^c | Möglichkeit, auf vorherige Seiten der Lernumgebung zurückzugreifen. | <i>Man konnte nochmal zurück blättern und sich vergewissern, ob man es verstanden hat oder einfach die Möglichkeit hat nochmal die Grundlagen oftmals zu wiederholen.</i> |
| keine Zeitvorgabe ^c | Möglichkeit, in einem eigenen Arbeitstempo mit dem Modell zu arbeiten. | <i>Durch unser Arbeitstempo.</i> |
| Erfahrung mit GeoGebra ^d | Vorteilhafte Vorerfahrungen im Umgang mit der DGS GeoGebra | <i>Da ich schon einmal mit GeoGebra gearbeitet habe, weiß ich was man bewegen muss, um etwas spezielles zu erreichen.</i> |
| Vorkenntnisse in der Optik ^d | Bereits vorhandene Kenntnisse der modellierten Inhalte | <i>Weil die Erkenntnis aus den Modellen schon vorher feststand.</i> |
| grundsätzlich positive Einstellung ^d | Entspannte Herangehensweise ohne bestimmten Grund | <i>Ich gehe entspannt an diese Aufgaben heran.</i> |
| Erklärung durch den Betreuer ^d | Sicherheit aufgrund der Betreuung | <i>Albert hat im Vorfeld präzise erklärt, wie wir die Sache handhaben sollen, somit hatte ich nicht den Eindruck, dass mir etwas misslingen könnte.</i> |

Anmerkung. Die Aspekte wurden in Aussagen im Hinblick auf eine oder mehrere Subskalen der KIM wiedergefunden.

- a. Interesse/Vergnügen
- b. wahrgenommene Kompetenz
- c. wahrgenommene Wahlfreiheit
- d. kein Druck/Anspannung

Anhang

Tabelle 44: Kategorien und Beschreibungen der negativen Motivationsaspekte bei der Arbeit mit einem dynamischen Modell

| Kategorie | Beschreibung | Beispiel |
|--|--|---|
| monotone Arbeitsweise ^a | Eintönige Handlung oder Langeweile während der Arbeit mit dem Modell | <i>Das Arbeiten an den Modellen war für mich eher monoton.</i> |
| Abneigung gegenüber digitalen Medien ^a | Negative Einstellung gegenüber dem Lernen mit digitalen Medien oder der DGS GeoGebra | <i>Ich arbeite generell nicht gerne mit GeoGebra oder sonstigen Programmen dieser Art. Oftmals muss ich gestehen, dass ich auch den Sinn dahinter nicht verstehe.</i> |
| technische Schwierigkeiten ^{a/b/d} | Schwierigkeiten mit der Hard- und/oder Software | <i>In erster Linie, dass es am Anfang nicht funktionierte, doch dann war es am Ende doch ganz angenehm, weil man viele verschiedene Möglichkeiten hatte, sich die Sachen anders(unter einem anderen Blickwinkel) anzuschauen.</i> |
| Konzentrationsschwäche ^b | Tagesformabhängige niedrige Leistungsfähigkeit | <i>Schon seit 8 Stunden am Arbeiten und Konzentration lässt nach.</i> |
| ungewohnte Aufgabenstellung ^b | Überraschende Anforderungen nach der Arbeit mit dem Modell | <i>Dann aber muss ich Zusammenhänge mit Winkeln angeben. Das hat mich dann überrascht.</i> |
| fehlende Erfahrung mit GeoGebra ^{b/c} | Nichtvorhandene Vorerfahrungen im Umgang mit der DGS GeoGebra | <i>Ich habe nicht die Erfahrung mit GeoGebra, deswegen kann ich mich nicht geschickt anstellen oder habe es auch nicht probiert.</i> |
| fehlende Vorkenntnisse in der Optik ^{b/d} | Nichtvorhandene oder widersprüchliche Kenntnisse der modellierten Inhalte | <i>Mein Wissenstand hat mich bei der Arbeit mit den Modellen gehindert, mich geschickt anzustellen.</i> |
| unübersichtliche Gestaltung des Modells ^{b/c} | Unvorteilhafte Darstellung und Gestaltung des Modells | <i>... manchmal war mir das GeoGebra Modell nicht ganz eindeutig.</i> |
| Angst vor Fehlern ^b | Unsicherheit aufgrund der Wahrscheinlichkeit, dass Fehler unterlaufen könnten. | <i>Angst etwas falsch zu machen.</i> |

| | | |
|---|--|---|
| unangenehme Beobachtung ^{b/d} | Unsicherheit aufgrund der Aufnahme bzw. Auswertung der Arbeit mit dem Modell | <i>Ich fühlte mich ein bisschen unter Druck, weil meine Ergebnisse von anderen nicht anonym gesehen werden.</i> |
| unklare Elementarisierung und Visualisierung ^c | Unvorteilhafte Darstellung physikalischer Zusammenhänge | <i>... mir fiel es manchmal schwer zu entscheiden, was im Modell genau erklärt bzw. dargestellt werden sollte.</i> |
| Unbestimmtheit ^d | Verwirrung durch die offene Arbeitsform mit dem Modell | <i>... durch offene Lösungsfindung ist mir zunächst unklar, was ich beobachten soll, da der Auftrag jeweils erst auf der Folgeseite zu lesen war.</i> |
| Zeitdruck ^d | Anspannung durch den Mangel an Zeit | <i>... aufgrund von Zeitmangel ...</i> |
| Einzelarbeit ^d | Anspannung durch die eigenständige Arbeit mit dem Modell | <i>Zudem bin ich stark auf mich allein gestellt.</i> |
| keine neuen Vorstellungen ^d | Enttäuschung, da keine neuen Erkenntnisse gewonnen wurden. | <i>Ich habe gemerkt, dass ich nicht ganz die Zusammenhänge verstanden habe, die ich dann bei den Hypothesen nennen sollte.</i> |
| Schamgefühl ^d | Möglichkeit, einen schlechten Eindruck von sich zu erwecken. | <i>... nicht den Eindruck zu vermitteln das Thema im Geringsten nicht verstanden zu haben.</i> |
| Teilnahme an einer Studie ^d | Möglichkeit, schlechte Ergebnisse für die Studie zu liefern | <i>Möglichst gut für die Studie helfen</i> |
| Vergleich innerhalb der Gruppe ^d | Möglichkeit des direkten Vergleichs in der Gruppe | <i>Mein Partner war schon fertig und ich kam mir dumm vor.</i> |

Anmerkung. Die Aspekte wurden in Aussagen im Hinblick auf eine oder mehrere Subskalen der KIM wiedergefunden.

- a. kein Interesse/Vergnügen
- b. keine wahrgenommene Kompetenz
- c. keine wahrgenommene Wahlfreiheit
- d. Druck/Anspannung

Ziele des Experiments zur Brechung an der Halbkreisscheibe

Tabelle 45: Kategorien und Beschreibungen der Ziele des Experiments zur Brechung an der Halbkreisscheibe

| Kategorie | Beschreibung | Name |
|---|---|--------------------|
| Bestandteile des Experiments variieren | Eine Halbkreisscheibe mit einer anderen Größe einsetzen | eVar _B |
| | Einfallswinkel kontrollieren und Eintrittsstelle variieren | eVar _P |
| | Eintrittsstelle kontrollieren und Einfallswinkel variieren | eVar _α |
| | Winkelscheibe unterlegen | eVar _W |
| Grenzen des Experiments untersuchen | Eintrittsstelle in der Nähe des oberen oder unteren Rands der Halbkreisscheibe wählen | eRan _P |
| | Große Einfallswinkel ausprobieren | eRan _α |
| experimentierbezogene Einstellungen vornehmen | Mitte der Halbkreisscheibe mit dem Laser anvisieren (→ Brechung beim Austritt vermeiden) | eEin _{PM} |
| | Eintrittsstelle von der Mitte zum Rand der Halbkreisscheibe verschieben ^a (→ Einfluss der Eintrittsstelle auf die Brechung beim Austritt untersuchen) | eEin _V |
| | Halbkreisscheibe mittig auf der Winkelscheibe ausrichten (→ Voraussetzung für die Messung der Brechung beim Eintritt herstellen) | eEin _{WM} |
| | Mitte der Winkelscheibe mit dem Laser anvisieren (→ α mithilfe von W messen) | eEin _{WP} |

a. Das Ziel Ein_V wurde von der weiteren Analyse ausgeschlossen, da seine Erfassung einen zu großen Interpretationsspielraum besitzt und nicht objektiv gemessen werden kann.

Vergleich zwischen Modell und Experiment

Tabelle 46: Kategorien und Beschreibungen der Gemeinsamkeiten und Unterschiede beim Vergleich zwischen Modell und Experiment

| Art | Kategorie | Beschreibung | Beispiel (ID) | Name |
|------------------------------|--------------------------------------|--|---|------|
| Gemeinsamkeit (Gem) | Brechung | Beobachtung, dass das Licht gebrochen wird. | <i>[Die] Lichtbrechung [ist] bei beiden sichtbar. (5)</i> | GH1 |
| | Brechungsindex | Begründung der Brechung durch unterschiedliche Brechungsindizes. | <i>Die Aussage zu den identischen Brechzahlen und der Differenz der Brechzahlen sind bestätigt bzw. nicht widerlegt worden. (1)</i> | GH2 |
| | Keine Brechung | Situationen, in denen das Licht bei Ein- und Austritt nicht gebrochen wird. | <i>Wenn der Lichtstrahl senkrecht durch Halbkreiskörper verläuft, wird dieser nicht gebrochen. (21)</i> | GH3 |
| | Lichtweg durch die Mitte und am Rand | Beobachtung der Lichtbrechung in Abhängigkeit von der Eintrittsstelle. | <i>Licht wird an der Austrittsfläche nicht gebrochen, wenn es durch den Kreismittelpunkt geht. (10)</i> | GH4 |
| | Ähnlichkeit der Systeme | Ähnliche Formen, Variablen und Ziele in beiden Systemen. | <i>Lichtstrahl wird untersucht am Halbkreis Plexiglaskörper unter versch. Einfallswinkeln. (14)</i> | Sys |
| Unterschied im Modell (UntM) | Anzahl der Variablen | Angabe der Variablen, die im Modell verändert werden können. | <i>Mit dem Modell kann man [die] Plexiglasgröße [und die] Dichte des Mediums variieren. (9)</i> | Var |
| | Genauigkeit der Werte | Verweis auf die Genauigkeit, mit der Werte in einem Modell angegeben werden. | <i>Winkel können in GeoGebra genau abgelesen werden. (6)</i> | Gen |
| | Vereinfachung des Systems | Vereinfachungen, die im Modell vorgenommen wurden. | <i>[Im] Modell [sind] nur relevante Strahlen sichtbar. (3)</i> | Ver |
| | Hilfestellungen | Objekte, die im Modell zusätzlich hinzugefügt wurden. | <i>Versuch hat keine Werte [und] keine Hilfslinien (z. B. Lot und Winkel) [...]. (38)</i> | Hil |

Anhang

| | | | | |
|----------------------------------|---------------------|---|--|-----|
| Unterschied im Experiment (UntE) | Totalreflexion | Beobachtung des Lichts, das die Halbkreisscheibe nicht verlässt. | <i>Bei Realität sieht man die Totalreflexion. (12)</i> | Tot |
| | Reflexion | Beobachtung des Lichts, das an der ersten Grenzfläche reflektiert wird. | <i>[Ein] reflektierter Strahl ist an der ersten Mediengrenze zu erkennen. (31)</i> | Ref |
| | ungebrochenes Licht | Beobachtung des Lichts, das von oben in die Halbkreisscheibe eindringt und ungebrochen erscheint. | <i>Man sieht zum gebrochenen Strahl auch noch den Strahl, der gerade durchgeht [und] stört. (15)</i> | Ung |
| | Messfehler | | <i>[...] ungenauerer Ablesen der Winkel und Messfehler können auftreten. (26)</i> | Mes |

Tabelle 47: Protokollierte Gemeinsamkeiten und Unterschiede und zugeordnete Kategorien

| ID Gemeinsamkeiten und Unterschiede | Kategorie |
|--|---------------------------------|
| 1 <i>Die Aussage zu den identischen Brechzahlen und der Differenz der Brechzahlen sind bestätigt bzw. nicht widerlegt worden. Der nicht mehr aus dem Halbkreis ausgetreten Strahl ($\beta_2 > 90^\circ$) hingegen wurde totalreflektiert, was im Modell nicht nachweisbar gewesen ist.</i> | GH2 Tot |
| 2 <i>Gemeinsamkeiten: Strahl nicht reflektiert, wenn er durch die Mitte geht. Unterschied: bei größerer Brechzahl -> größere Ablenkung -> nicht realisierbar.</i> | GH4 Var |
| 3 <i>Hypothesen werden bestätigt. Bei verschiedenen Spezialfällen kommt es zur Totalreflexion. Gemeinsamkeiten: 2-fache Brechung, Variabilität bei beiden. Unterschiede: Genauigkeit bei Modell idealisiert. Bei Modell nur relevante Strahlen sichtbar.</i> | GH1 Sys Gen Ver Tot |
| 4 <i>Die Hypothese konnte bestätigt werden. Gem: Beides Variabel (viele Selbstversuche), eingeschränkt Größe von Plexiglas Halbkreis ändern. Unter: Modell ist idealisierte Variante von Realex. Nur relevante Strahlen sichtbar. Modell ist genauer als im Exp.</i> | Sys Var Gen Ver |
| 5 <i>Gemeinsamkeiten: Einfallswinkel variierbar. Lichtbrechung bei beiden sichtbar. Unterschied: mit dem Modell kann man Plexiglasgröße, Dichte des Mediums variieren. Im Versuch kann man Licht aus allen Richtungen aufs Glas treffen lassen, im Modell nur von links. Im Modell kann man die Winkel mit der Winkelscheiben direkt ablesen. 1. Hypothese lässt sich bestätigen. 2. Hypothese lässt sich auch überprüfen.</i> | GH1 Sys Var |
| 6 <i>Reflexion real auch sichtbar. Brechungsindex veränderbar. Q veränderbar. Lichtbrechung bei beiden sichtbar. Q nur auf einer Seite. Winkel können in GeoGebra genau abgelesen werden.</i> | GH1 Sys Var Gen Ref |
| 7 <i>Gemeinsamkeiten: Teilweise Reflexion an der Oberfläche. Doppelte Brechung an den Grenzübergängen. Unterschiede: Strahl, der gerade durch geht.</i> | GH1 Ref Ung |
| 8 <i>Gemeinsamkeiten: teilweise Reflexion. doppelte Brechung. Unterschiede: Strahl geht gerade durch.</i> | GH1 Ref Ung |

Anhang

| | | |
|----|---|---------------------------------|
| 9 | <i>Gemeinsamkeiten. An der Austrittsfläche wird der gebrochene Strahl nicht gebrochen. Einfallswinkel 20 und Ausfallswinkel 14 also zum Lot hin (von dünn nach dicht) vom Lot weg (von dicht nach dünn). Unterschiede: der Strahl trennt sich ca. 2 cm nach Eintritt in das Plexiglas, ein Strahl kommt raus, der andere verbleibt im Plexiglas. Je näher wir zum Kreismittelpunkt gehen, desto weniger gebrochen ist der Strahl. Je mehr geneigt, desto stärker gebrochen.</i> | GH1 GH4 Ung |
| 10 | <i>Gemeinsamkeiten: Licht wird an der Austrittsfläche nicht gebrochen, wenn es durch den Kreismittelpunkt geht. Vom optisch dünneren zum dichteren Stoff wird das Licht zum Lot hin gebrochen. Vom optisch dichteren zum dünnen Stoff wird das Licht vom Lot weggebrochen. Unterschiede: Licht teilt sich beim Eintritt in zwei Bündel. Hypothesen bestätigt.</i> | GH1 GH4 Ung |
| 11 | <i>Unterschied: Auf 2 Halbkreiskörper bei Natur beschränkt. Modell unendlich viele Brechungsindizes veränderbar bei Modell; Modell exakter. Gemeinsamkeiten: Aufbau, Winkel bei beiden ablesbar, Lichtstrahlen identisch. Vorhersagen bestätigt.</i> | Sys Var Gen |
| 12 | <i>Unterschied: Mit GeoGebra Halbkreiskörper besser einstellbar. n_1, n_2 ändern. Winkel werden direkt angegeben. Bei Realität sieht man die Totalreflexion. Gemeinsamkeiten: Phänomen der Brechung ist bei beiden zu zeigen. Modell vereinfacht vieles. Vorhersagen können bestätigt werden.</i> | GH1 Var Gen Ver Tot |
| 13 | <i>Gemeinsamkeiten: Halbkreiskörper, geometrische Hilfsmittel- Lichtquelle. Unterschiede: Flüssigkeit kein Schieberegler und Veränderung von Brechungsindex -> keine Variation.</i> | Sys Var |
| 14 | <i>Lichtstrahl wird untersucht am Halbkreis Plexiglaskörper unter versch. Einfallswinkeln. Kein Modell, sondern haptisch ergreifbar. In Modell stets senkrecht und genau ablesbar.</i> | Sys Gen |
| 15 | <i>Im Modell wird Licht beim Austreten des Glaskörpers nicht mehr gebrochen, man glaubt, dass das Licht an der Grenze Glas/Luft endet. Im Exp. ist dies nicht der Fall. Exp. man sieht zum gebrochenen Strahl auch noch den Strahl, der gerade durchgeht -> stört.</i> | Ver Ung |
| 16 | <i>Das Licht trifft im Gegensatz zum Modell auch aus, wenn es auf den Rand der Vorderseite trifft. Im Körper sind zwei Strahlen zu sehen (gebrochen und nicht gebrochen).</i> | Ung |
| 17 | <i>Lichtstrahl kann ähnlich variiert werden. Im GeoGebra Modell ist die Reflexion nicht sichtbar. Beim Austritt aus dem dichteren Medium wird der Strahl vom Lot weg gebrochen -> nicht hin.</i> | Sys Ref |
| 18 | <i>Im Experiment sind mehr im Plexiglaskörper Strahlen zu erkennen. Das Experiment zeigt wie im Modell den gebrochenen Strahl. Die Hypothesen haben sich bestätigt.</i> | GH1 Ung |

| | |
|--|--|
| 19 Beim Übergang des Lichtstrahls über den Mittelpunkt des Lichtstrahls, verläuft der Lichtstrahl geradlinig durch. Auch beim Austritt. Hypothese bestätigt geradlinigen Verlauf. Gemeinsamkeit: Wenn der Laserstrahl am unteren Ende eintritt, so verhält es sich [...]. Unterschiede: Beobachtung von Reflexion. | GH4 Ref |
| 20 Beim Übergang des Lichtstrahls über den Mittelpunkt der Eintrittsfläche verläuft der Lichtstrahl geradlinig durch (auch beim Austritt). Hypothese bestätigt. Gemeinsamkeit: Laserstrahl verläuft konvergent, wenn der Lichtstrahl an dem unteren Ende der Eintrittsfläche strahlt. Unterschied zum Modell: Beobachtung von Reflexion! Messung beim Modell besser! | GH4 Gen Ref |
| 21 Je nachdem, wie der Einfallswinkel des Laserlichts ist, wird der Lichtstrahl unterschiedlich gebrochen. Bsp.: Wenn der Lichtstrahl senkrecht durch Halbkreiskörper verläuft, wird dieser nicht gebrochen. Wenn der Lichtstrahl nicht senkrecht zur ersten Grenzfläche ist, dann wird er zum Lot hin gebrochen. | GH1 GH3 |
| 22 In Abhängigkeit dessen, wie der Laserstrahl bzw. der Einfallswinkel ist, wird das Licht unterschiedlich gebrochen. Verläuft der Strahl senkrecht auf die Grenzfläche wird er nicht gebrochen. Trifft er nicht senkrecht auf die Grenzfläche, so wird er zum Lot hin gebrochen. Wenn der Strahl zwei Mal auf die Grenzfläche trifft, wird er zwei Mal gebrochen. | GH1 GH3 |
| 23 Es werden nur transmittierte Strahlen dargestellt. Reflexion (Totalreflexion) wird nicht abgebildet. Laser ist keine punktförmige Lichtquelle. Strahlengänge werden vereinfacht dargestellt. Betrachtung eines Strahls (Hauptstrahl). | Gen Ver Tot |
| 24 (+) Zu brechende Strahlen/Strahlengang ist sichtbar. (-) Reflektierende Strahlen werden nicht eingezeichnet, Grenzfall totale Reflexion nicht betrachtet, Laser nicht ideal mit punktförmiger Lichtquelle. Laser trifft auf Oberfläche des Halbkreises, deshalb drei Strahlen mit Reflexion. | GH1 Gen Tot Ref Ung |
| 25 Gemeinsamkeiten: Anwendung des Brechungsgesetzes, gleiche Versuchsgegenstände, gleiches Ziel. Unterschiede: Winkel können nicht so genau gemessen werden, Messfehler, reflektierten Lichtstrahl sieht man nicht. Man sieht den Teil des Lichts nicht, der durchläuft. | GH2 Sys Gen Ref Ung Mes |
| 26 Gemeinsamkeiten: Anwendung des Brechungsgesetzes, gleiche Versuchsgegenstände, gleiches Ziel. Unterschied: Praxis, ungenaueres Ablesen der Winkel und Messfehler können auftreten. Im Modell sieht man den reflektierten Lichtstrahl nicht und den Teil des Licht, der geradlinig durchläuft. | GH2 Sys Ref Ung Mes |
| 27 Gemeinsamkeiten: Der Brechungswinkel verhält sich gleich zum Modell. Unterschiede: Wegen dem Laserstrahl wird das Licht mehrfach gebrochen, als im Modell, da es länglich ist. | GH1 Ung |

Anhang

| | | |
|--------|---|--------------------------|
| 28 | <i>Gemeinsamkeiten: Brechungswinkel verhält sich beim Variieren des Einfallswinkels wie im Modell. Unterschied: Da Baulaser nicht nur ein „Strahl“, sondern länglich verläuft, wird an mehreren Stellen am Plexiglas das Licht unterschiedlich gebrochen. So sind mehrere „Lichtstrahlen“ zu sehen.</i> | GH1 Ung |
| 29 | <i>Gemeinsamkeiten: Brechung beim Ein- und Austritt in bzw. aus dem Medium eines Strahls. Unterschiede: Auftreten mehrerer Strahlen. Es wird nicht nur der gebrochene Strahl sichtbar, sondern auch ein reflektierter Strahl.</i> | GH1 Ref Ung |
| 30 | <i>Gemeinsamkeiten: Brechung des Lichtstrahls beim Ein- und Austritt aus den Medien. Unterschiede: Auftreten mehrere Strahlen. Partielle Reflexion der Strahlen. Es werden mehrere Strahlen sichtbar.</i> | GH1 Ref Ung |
| 31 | <i>Gemeinsamkeiten: Zwei Brechungen an der ersten und zweiten Mediengrenze. Totalreflexion gesehen und alle anderen Phänomene. Unterschiede: Reflektierter Strahl ist an der ersten Mediengrenze zu erkennen.</i> | GH1 Tot Ref |
| 32 | <i>Brechungsrichtung gut gesehen. Totalreflexion gut zu erkennen (größerer Strahl oben auch zu sehen). Reflektierter Strahl an der Kante zu sehen in Bsp. [Modell] nicht.</i> | GH1 Tot Ref Ung |
| 33 (+) | <i>Winkelmessung, Quelle und Einfallspunkt verschiebbar (-) mehrere Lichtstrahlen, reflektierter Lichtstrahl</i> | Sys Ref Ung |
| 34 | <i>Einfallsstrahl trifft senkrecht auf gerade Grenzfläche -> keine Brechung. An anderer Grenzfläche -> Brechung. Applet zeigt dies auch. Weitere Brechungsformen bei beiden: Doppelt-Brechung, Totalreflexion. Ich glaube Reflexionsstrahl wurde im Applet nicht gezeigt.</i> | GH1 GH3 Ref |
| 35 | <i>Alle Phänomene, die auf dem Modell zu erkennen sind, sind wieder im Versuch zu erkennen. Im Modell sind die Störreflexionen nicht zu sehen.</i> | Ref |
| 36 | <i>Beide Male wird das Licht zweimal gebrochen. Es gibt zwei sichtbare Linien bei unserem Versuch, da dies kein Punktlaser ist und so der Strahl auf der Oberfläche des Mediums zu sehen ist.</i> | GH1 Gen Ung |
| 37 | <i>Der Baulaser hat keinen punktförmigen Strahl, sondern eine Strahlebene. Ein Teil der Strahlebene wird gebrochen und ein Teil verläuft geradlinig durch ohne Brechung.</i> | GH1 Gen Ung |
| 38 | <i>Gemeinsamkeiten: gleicher Versuch. Unterschiede: Versuch hat keine Werte & keine Hilfslinien (z. B. Lot und Winkel) und hat noch weitere Reflexionen. Modell ist genauer, aber weitere Reflexionen ausgeblendet.</i> | Sys Gen Hil Ref |
| 39 | <i>Durchführung: Beide beschreiben: Einfallswinkel und Brechungswinkel. Bei Modell sind auch die verschiedenen Werte zu variieren. Bei dem Versuch könnte man aber auch die Reflexion beobachten.</i> | Sys Ref |

| | | |
|----|--|-----|
| 40 | <i>Gemeinsamkeiten: Doppelbrechung je weiter das Licht sich vom Mittelpunkt entfernt. Lichtstrahl durch Mittelpunkt -> einfache Brechung.</i> | GH3 |
| | <i>90° keine Brechung. Unterschiede: Reflexionen nicht angezeigt. Zwei Strahlen werden sichtbar.</i> | GH4 |
| | | Ref |
| | | Ung |
| 41 | <i>Gemeinsamkeiten: Doppelbrechung. Durch den Mittelpunkt nur eine Brechung. 90° Winkel keine Brechung. Unterschiede: Reflexion nur in Natura. Irritation durch zu breiten Strahl (zwei Strahlen werden sichtbar). Bei Demo -> eingezeichnetes Lot.</i> | GH1 |
| | | GH3 |
| | | GH4 |
| | | Hil |
| | | Ref |
| | | Ung |

Ergebnisse

Tabelle 48: Skalenkennwerte der quantitativ erhobenen Merkmale

| Merkmal | Anzahl der Items | M | SD | SEM | 95 %-CI | | α^a | p^b |
|---|---------------------|-----|-----|-----|---------|-----|------------|------------|
| | | | | | UG | OG | | |
| Fachwissen zur Brechung (fwb) | 1 ^c | .72 | .14 | .02 | .68 | .77 | - | .63 |
| mathematische SWE (mse) | 9 | .74 | .14 | .02 | .70 | .78 | .89 | .48 |
| Prozessfähigkeit (msep) | 3 | .71 | .16 | .03 | .66 | .76 | .80 | .26 |
| Handwerk (mseh) | 3 | .78 | .15 | .02 | .74 | .83 | .80 | .03 |
| Visualisierung (msev) | 3 | .73 | .18 | .03 | .67 | .78 | .85 | .01 |
| experimentierbezogene SWE (ese) | 8 | .73 | .12 | .02 | .69 | .77 | .88 | .03 |
| computerbezogene SWE (cse) | 7 | .68 | .20 | .03 | .62 | .74 | .91 | .07 |
| Computerangst (can) | 2 | .11 | .13 | .02 | .07 | .15 | .36 | .01 |
| Computer machen mir Angst. (can1) | 1 | .12 | .18 | .03 | .07 | .18 | - | .01 |
| Wenn ich einen Computer benutze, dann befürchte ich, dass ich eine falsche Taste drücken und ihn beschädigen könnte. (can2) | 1 | .10 | .15 | .02 | .06 | .15 | - | .01 |
| Computer beim Lernen (cle) | 3 | .73 | .13 | .02 | .69 | .77 | .76 | .01 |
| intrinsische Motivation (kim) | 12 | .59 | .13 | .02 | .55 | .63 | .82 | .03 |
| Interesse/Vergnügen (kimi) | 3 | .66 | .18 | .03 | .60 | .72 | .82 | .01 |
| wahrgenommene Kompetenz (kimk) | 3 | .52 | .18 | .03 | .46 | .58 | .84 | .03 |
| wahrgenommene Wahlfreiheit (kimw) | 3 | .67 | .14 | .02 | .63 | .72 | .69 | .03 |
| Druck/Anspannung (kimd) | 3 | .51 | .23 | .04 | .44 | .58 | .83 | .04 |

Anmerkung. Die angegebenen Mittelwerte M stellen relative Angaben dar, sodass der kleinstmögliche Wert der Skala bei 0 und der größtmögliche Wert bei 1 liegt. Neben der Standardabweichung SD wird der Standardfehler des Mittelwerts SEM sowie die Unter- und Obergrenze (UG und OG) eines 95 %-Konfidenzintervall (CI) berichtet.

a. Cronbachs Alpha nach Cronbach (1951)

b. Signifikanzwert des Shapiro-Wilk-Tests auf Normalverteilung nach Shapiro und Wilk (1965) mit $p > .05$ fett gedruckt.

c. Der Fachwissenstest umfasst 18 Aufgaben, aber der Mittelwert ergibt sich aus den geschätzten Fähigkeitswerten pro Person.

Tabelle 49: Häufigkeitswerte der qualitativ erfassten Ziele des Modells

| Merkmal | H | d | H_d | h_d |
|--|-----|-----|-------|-------|
| Ziele des Modells (mzi) | 282 | 14 | 20.1 | .49 |
| Bestandteile des Modells variieren (mVar) | 164 | 6 | 27.3 | .67 |
| Breite der Halbkreisscheibe verändern (mVar _B) | 17 | 1 | 17 | .41 |
| Eintrittspunkt verschieben (mVar _P) | 36 | 1 | 36 | .88 |
| Einfallswinkel variieren (mVar _α) | 29 | 1 | 29 | .71 |
| Verlängerung einblenden (mVar _V) | 27 | 1 | 27 | .66 |
| Winkelscheibe einblenden (mVar _W) | 29 | 1 | 29 | .71 |
| Brechungsindex variieren (mVar _n) | 26 | 1 | 26 | .63 |
| Grenzen des Modells untersuchen (mRan) | 75 | 4 | 18.8 | .46 |
| Eintrittspunkt (mRan _P) | 24 | 1 | 24 | .59 |
| Brechungsindex (mRan _n) | 21 | 1 | 21 | .51 |
| Größe der Halbkreisscheibe (mRan _B) | 12 | 1 | 12 | .29 |
| Einfallswinkel (mRan _α) | 18 | 1 | 18 | .44 |
| messbezogene Einstellungen vornehmen (mEin) | 43 | 4 | 10.8 | .26 |
| Brechung beim Austritt vermeiden (mEin _{PM}) | 14 | 1 | 14 | .34 |
| Brechung beim Austritt untersuchen (mEin _V) | 14 | 1 | 14 | .34 |
| Messung vorbereiten (mEin _{WM}) | 2 | 1 | 2 | .05 |
| Einfallswinkel messen (mEin _{WP}) | 13 | 1 | 13 | .32 |

Anmerkung. Die absoluten Häufigkeiten H beziehen sich teilweise auf Klassen mit einer unterschiedlichen Klassenbreite d (Anzahl der Ziele einer Kategorie), sodass $H_d = \frac{H}{d}$ die absolute und $h_d = \frac{H_d}{N}$ die relative Häufigkeitsdichte darstellen.

Anhang

Tabelle 50: Häufigkeitswerte der qualitativ erfassten Ziele des Experiments und der entsprechenden Ziele des Modells ($N = 20$)

| Merkmal | Experiment | | | | Modell |
|--|------------|-----|-------|-------|--------|
| | H | d | H_d | h_d | h_d |
| Ziele des Experiments (ezi) | 110 | 9 | 12.2 | .61 | .49 |
| Bestandteile des Experiments variieren (eVar) | 50 | 4 | 12.5 | .63 | .68 |
| Halbkreisscheibe wechseln (eVar _B) | 7 | 1 | 7 | .35 | .43 |
| Eintrittsstelle variieren (eVar _P) | 17 | 1 | 17 | .85 | .88 |
| Einfallswinkel variieren (eVar _α) | 15 | 1 | 15 | .75 | .70 |
| Winkelscheibe unterlegen (eVar _W) | 11 | 1 | 11 | .55 | .73 |
| Grenzen des Experiments untersuchen (eRan) | 21 | 2 | 10.5 | .53 | .50 |
| Eintrittsstelle am Rand auswählen (eRan _P) | 16 | 1 | 16 | .80 | .58 |
| große Einfallswinkel ausprobieren (eRan _α) | 5 | 1 | 5 | .25 | .43 |
| experimentierbez. Einstellungen vornehmen (eEin) | 39 | 3 | 13.0 | .65 | .24 |
| Brechung beim Austritt vermeiden (eEin _{PM}) | 18 | 1 | 18 | .90 | .34 |
| Messung vorbereiten (eEin _{WM}) | 10 | 1 | 10 | .50 | .05 |
| Einfallswinkel messen (eEin _{WP}) | 11 | 1 | 11 | .55 | .33 |

Anmerkung. Die relativen Häufigkeitsdichten h_d der entsprechenden Ziele des Modells basieren auf den mittleren Werten von zwei bzw. drei Personen pro Gruppe.

Tabelle 51: Ergebnisse der t-Tests bei verbundenen Stichproben zu den Unterschieden der im Modell und Experiment erreichten Ziele ($N = 20$)

| Differenz der Ziele | M | SD | SEM | 95 %-CI | | $t(19)$ | p | d^a |
|---------------------|------|------|-------|---------|------|---------|-------------|-------|
| | | | | UG | OG | | | |
| VarP | -.03 | .44 | .10 | -.23 | .18 | -0.25 | .804 | -.06 |
| Varα | .05 | .46 | .10 | -.16 | .26 | 0.49 | .629 | .11 |
| VarB | -.08 | .52 | .12 | -.32 | .17 | -0.65 | .527 | -.14 |
| VarW | -.18 | .63 | .14 | -.47 | .12 | -1.23 | .232 | -.28 |
| Ranα | -.18 | .47 | .10 | -.39 | .04 | -1.68 | .110 | -.38 |
| RanP | .23 | .47 | .11 | .00 | .45 | 2.13 | .046 | .48 |
| EinWP | .23 | .64 | .14 | -.07 | .52 | 1.58 | .131 | .35 |
| EinWM | .45 | .48 | .11 | .22 | .68 | 4.16 | .001 | .93 |
| EinPM | .56 | .56 | .13 | .30 | .82 | 4.47 | .000 | 1.00 |

Anmerkung. Die Mittelwerte M geben die mittlere Differenz erreichter Ziele im Experiment im Vergleich zum Modell an (z. B. VarP = eVarP – mVarP). Es werden Standardabweichung SD , der Standardfehler des Mittelwerts SEM sowie die Unter- und Obergrenze (UG und OG) eines 95 %-Konfidenzintervall (CI) berichtet. Signifikanzwerte $p < .05$ sind fett gedruckt.

a. Cohens d nach Cohen (1988) mit kleinem Effekt bei $|d| > .20$, mittleren Effekt bei $|d| > .50$ und großem Effekt bei $|d| > .80$ (S. 25f)

Tabelle 52: Häufigkeitswerte der qualitativ erfassten Hypothese nach der Arbeit mit dem Modell

| Merkmal | H | d | H_d | h_d |
|--|-----|-----|-------|-------|
| Hypothesen (H) | 134 | 15 | 8.9 | .22 |
| Brechung (KH1) | 71 | 5 | 14.2 | .35 |
| Eintritt ohne Richtung (H1) | 22 | 1 | 22 | .54 |
| Austritt ohne Richtung (H2) | 22 | 1 | 22 | .54 |
| Eintritt mit Richtung (H3) | 12 | 1 | 12 | .29 |
| Austritt mit Richtung (H4) | 11 | 1 | 11 | .27 |
| Geradlinigkeit (H6) | 4 | 1 | 4 | .10 |
| Brechungsindex (KH2/H5) | 11 | 1 | 11 | .27 |
| keine Brechung (KH3) | 14 | 2 | 7 | .17 |
| keine Brechung beim Eintritt (H8) | 10 | 1 | 10 | .24 |
| keine Brechung beim Ein- und Austritt (H9) | 4 | 1 | 4 | .10 |
| Lichtweg (KH4) | 19 | 2 | 9.5 | .23 |
| Mitte der Halbkreisscheibe (H11) | 11 | 1 | 11 | .27 |
| Linseneffekt (H14) | 8 | 1 | 8 | .20 |
| Totalreflexion (KH5/H15) | 10 | 1 | 10 | .24 |
| Sonstige | | | | |
| Winkelbeziehungen (H7) | 2 | 1 | 2 | .05 |
| Einfluss der Größe (H10) | 3 | 1 | 3 | .07 |
| Lot senkrecht auf Tangente (H12) | 2 | 1 | 2 | .05 |
| Winkelscheibe (H13) | 2 | 1 | 2 | .05 |

Anmerkung. Die absoluten Häufigkeiten H beziehen sich teilweise auf Klassen mit einer unterschiedlichen Klassenbreite d (Anzahl der Ziele einer Kategorie), sodass $H_d = \frac{H}{d}$ die absolute und $h_d = \frac{H_d}{N}$ die relative Häufigkeitsdichte darstellen.

Anhang

Tabelle 53: Häufigkeitswerte der qualitativ erfassten Gemeinsamkeiten und Unterschiede beim Vergleich zwischen Modell und Experiment

| Merkmal | H | d | H_d | h_d |
|--|-----|-----|-------|-------|
| vergleichende Aussagen (V) | 126 | 13 | 9.7 | .24 |
| Gemeinsamkeiten (Gem) | 50 | 5 | 10 | .24 |
| Brechung (GH1) | 22 | 1 | 22 | .54 |
| Brechungsindex (GH2) | 3 | 1 | 3 | .07 |
| Keine Brechung (GH3) | 5 | 1 | 5 | .12 |
| Lichtweg durch die Mitte und am Rand (GH4) | 7 | 1 | 7 | .17 |
| Ähnlichkeit der Systeme (Sys) | 13 | 1 | 13 | .32 |
| Unterschiede (Unt) | 76 | 8 | 9.5 | .23 |
| Unterschiede im Modell (mUnt) | 27 | 4 | 6.8 | .16 |
| Anzahl der Variablen (Var) | 7 | 1 | 7 | .17 |
| Genauigkeit der Werte (Gen) | 13 | 1 | 13 | .32 |
| Verkürzungen (Ver) | 5 | 1 | 5 | .12 |
| Hilfestellungen (Hil) | 2 | 1 | 2 | .05 |
| Unterschiede im Experiment (eUnt) | 49 | 4 | 12.3 | .30 |
| Totalreflexion (Tot) | 7 | 1 | 7 | .17 |
| Reflexion (Ref) | 20 | 1 | 20 | .49 |
| ungebrochenes Licht (Ung) | 20 | 1 | 20 | .49 |
| Messfehler (Mes) | 2 | 1 | 2 | .05 |

Anmerkung. Die absoluten Häufigkeiten H beziehen sich teilweise auf Klassen mit einer unterschiedlichen Klassenbreite d (Anzahl der Ziele einer Kategorie), sodass $H_d = \frac{H}{d}$ die absolute und $h_d = \frac{H_d}{N}$ die relative Häufigkeitsdichte darstellen.

Tabelle 54: Ergebnisse der t-Tests bei unabhängigen Stichproben zum Faktor *Anpassung der Oberfläche des Modells* (aom) in Abhängigkeit der formulierten Kernhypothesen

| Kernhypothese | | n | M | SD | SEM | 95 %-CI | | ΔM | t(39) | p | d |
|--------------------------------|---|----|------|------|-----|---------|------|------------|--------|------|------|
| | | | | | | UG | OG | | | | |
| Brechung (KH1) | X | 17 | -.05 | 1.16 | .28 | -0.65 | 0.55 | .09 | 0.275 | .785 | .09 |
| | ✓ | 24 | .04 | 0.89 | .18 | -0.34 | 0.41 | | | | |
| Brechungsindex (KH2) | X | 30 | -.01 | 0.99 | .18 | -0.38 | 0.36 | .03 | 0.073 | .940 | .03 |
| | ✓ | 11 | .02 | 1.07 | .32 | -0.70 | 0.74 | | | | |
| keine Brechung (KH3) | X | 31 | .04 | 1.03 | .18 | -0.34 | 0.42 | -.17 | -0.461 | .647 | -.17 |
| | ✓ | 10 | -.13 | 0.95 | .30 | -0.81 | 0.55 | | | | |
| Lichtweg durch die Mitte (KH4) | X | 26 | -.09 | 0.98 | .19 | -0.49 | 0.30 | .26 | 0.783 | .439 | .25 |
| | ✓ | 15 | .16 | 1.05 | .27 | -0.42 | 0.75 | | | | |
| Totalreflexion (KH5) | X | 31 | -.09 | 0.88 | .16 | -0.42 | 0.23 | .39 | 1.061 | .295 | .39 |
| | ✓ | 10 | .29 | 1.31 | .41 | -0.65 | 1.23 | | | | |

Anmerkung. Die Gruppenvergleiche basieren auf der Unterscheidung, ob die entsprechende Kernhypothese ganz bzw. teilweise formuliert (✓) oder überhaupt nicht formuliert wurde (X).

Tabelle 55: Ergebnisse der t-Tests bei unabhängigen Stichproben zum Faktor *Veränderung der Eigenschaften des Modells* (vem) in Abhängigkeit der formulierten Kernhypothesen

| Kernhypothese | | n | M | SD | SEM | 95 %-CI | | ΔM | t(39) | p | d |
|--------------------------------|---|----|------|------|-----|---------|------|------------|--------|-------------|------------|
| | | | | | | UG | OG | | | | |
| Brechung (KH1) | X | 17 | -.35 | 0.80 | .19 | -0.76 | 0.06 | .60 | 1.940 | .059 | .62 |
| | ✓ | 24 | .25 | 1.07 | .22 | -0.20 | 0.70 | | | | |
| Brechungsindex (KH2) | X | 30 | -.20 | 1.03 | .19 | -0.58 | 0.19 | .73 | 2.157 | .037 | .76 |
| | ✓ | 11 | .53 | 0.71 | .21 | 0.06 | 1.01 | | | | |
| keine Brechung (KH3) | X | 31 | .08 | 0.94 | .17 | -0.26 | 0.43 | -.33 | -0.906 | .371 | -.33 |
| | ✓ | 10 | -.25 | 1.19 | .38 | -1.10 | 0.60 | | | | |
| Lichtweg durch die Mitte (KH4) | X | 26 | -.07 | 1.10 | .22 | -0.52 | 0.37 | .20 | 0.604 | .550 | .20 |
| | ✓ | 15 | .13 | 0.83 | .21 | -0.33 | 0.58 | | | | |
| Totalreflexion (KH5) | X | 31 | .07 | 1.03 | .19 | -0.31 | 0.45 | -.29 | -0.790 | .434 | -.29 |
| | ✓ | 10 | -.22 | 0.90 | .28 | -0.86 | 0.42 | | | | |

Anmerkung. Signifikate oder annähernd signifikante Unterschiede können anhand des fett gedruckten Signifikanzwertes $p < .10$ abgelesen werden.

Anhang

Tabelle 56: Ergebnisse der t-Tests bei unabhängigen Stichproben zum Faktor *Untersuchung des Systems im Modell* (usm) in Abhängigkeit der formulierten Kernhypothesen

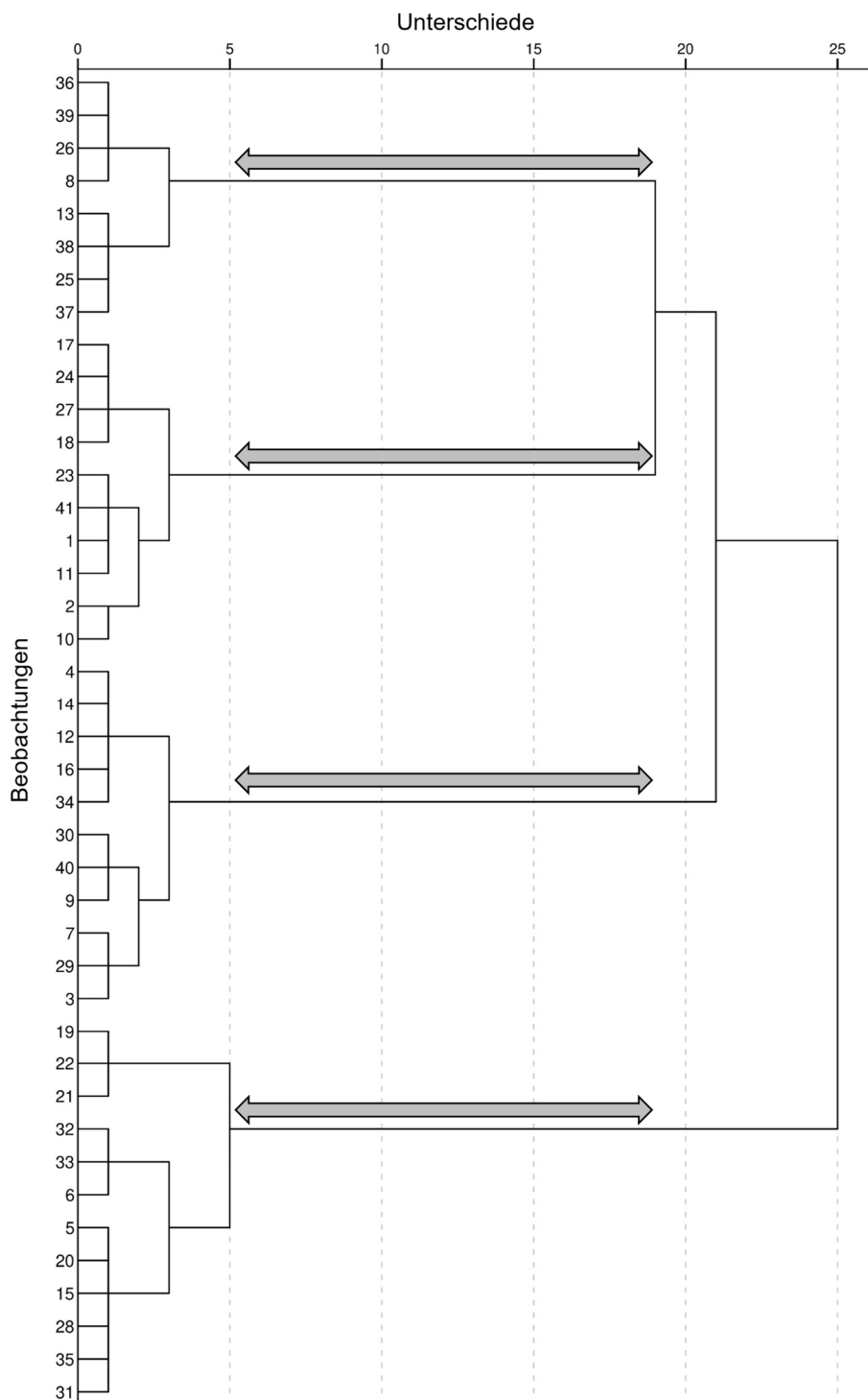
| Kernhypothese | | n | M | SD | SEM | 95 %-CI | | ΔM | t(39) | p | d |
|--------------------------------|---|----|------|------|-----|---------|------|------------|--------|-------------|------------|
| | | | | | | UG | OG | | | | |
| Brechung (KH1) | X | 17 | -.02 | 0.89 | .22 | -0.48 | 0.43 | .04 | 0.132 | .896 | .04 |
| | ✓ | 24 | .02 | 1.09 | .22 | -0.44 | 0.48 | | | | |
| Brechungsindex (KH2) | X | 30 | -.04 | 0.94 | .17 | -0.39 | 0.31 | .13 | 0.374 | .711 | .13 |
| | ✓ | 11 | .10 | 1.20 | .36 | -0.71 | 0.90 | | | | |
| keine Brechung (KH3) | X | 31 | .05 | 1.05 | .19 | -0.33 | 0.44 | -.22 | -0.595 | .555 | -.22 |
| | ✓ | 10 | -.17 | 0.86 | .27 | -0.78 | 0.45 | | | | |
| Lichtweg durch die Mitte (KH4) | X | 26 | -.21 | 0.89 | .18 | -0.57 | 0.15 | .56 | 1.785 | .082 | .58 |
| | ✓ | 15 | .36 | 1.10 | .28 | -0.25 | 0.97 | | | | |
| Totalreflexion (KH5) | X | 31 | -.18 | 1.05 | .19 | -0.56 | 0.20 | .73 | 2.103 | .042 | .76 |
| | ✓ | 10 | .56 | 0.58 | .18 | 0.14 | 0.97 | | | | |

Anmerkung. Signifikate oder annähernd signifikante Unterschiede können anhand des fett gedruckten Signifikanzwertes $p < .10$ abgelesen werden.

Tabelle 57: Ergebnisse der t-Tests bei unabhängigen Stichproben zum lernbezogenen Merkmal *Fachwissen zur Brechung* (fwb) in Abhängigkeit der formulierten Kernhypothesen

| Kernhypothese | | n | M | SD | SEM | 95 %-CI | | ΔM | t(39) | p | d |
|--------------------------------|---|----|-----|-----|-----|---------|-----|------------|--------|-------------|-------------|
| | | | | | | UG | OG | | | | |
| Brechung (KH1) | X | 17 | .77 | .15 | .04 | .69 | .85 | -.08 | -1.800 | .080 | -.57 |
| | ✓ | 24 | .69 | .13 | .03 | .63 | .74 | | | | |
| Brechungsindex (KH2) | X | 30 | .75 | .14 | .02 | .70 | .80 | -.11 | -2.243 | .031 | -.79 |
| | ✓ | 11 | .64 | .14 | .04 | .55 | .74 | | | | |
| keine Brechung (KH3) | X | 31 | .72 | .16 | .03 | .66 | .78 | .02 | 0.362 | .719 | .13 |
| | ✓ | 10 | .74 | .10 | .03 | .67 | .81 | | | | |
| Lichtweg durch die Mitte (KH4) | X | 26 | .71 | .14 | .03 | .65 | .76 | .04 | 0.949 | .349 | .31 |
| | ✓ | 15 | .75 | .15 | .04 | .67 | .83 | | | | |
| Totalreflexion (KH5) | X | 31 | .69 | .14 | .03 | .64 | .74 | .12 | 2.473 | .018 | .90 |
| | ✓ | 10 | .82 | .12 | .04 | .73 | .90 | | | | |

Anmerkung. Signifikate oder annähernd signifikante Unterschiede können anhand des fett gedruckten Signifikanzwertes $p < .10$ abgelesen werden.



Anmerkung. Es wurde das Verfahren nach Ward (1963) mit der quadrierten euklidischen Distanz als Maß durchgeführt. Die Unterschiede entsprechen der Kombination der skalierten Abstände des Clusters. Die Pfeile markieren den sprunghaften Anstieg der Unterschiede beim Übergang von fünf zu vier Clustern.

Abbildung 75: Dendrogramm zur Clusteranalyse der drei Faktoren der Arbeit mit dem Modell

Bildschirmaufnahmen der AR-Experimente

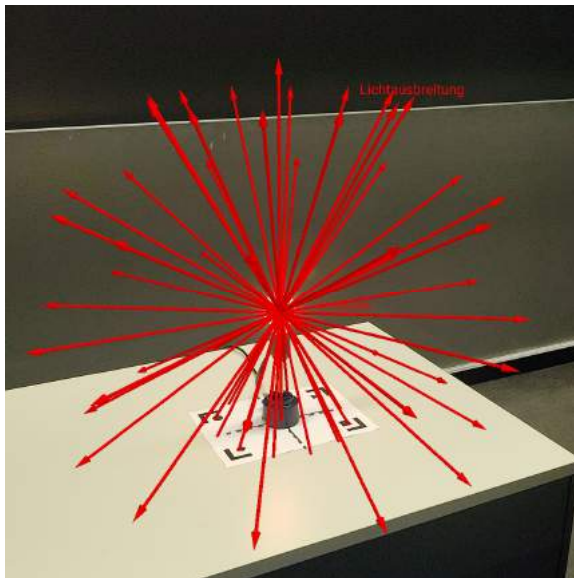


Abbildung 76: AR-Experiment zur Lichtausbreitung

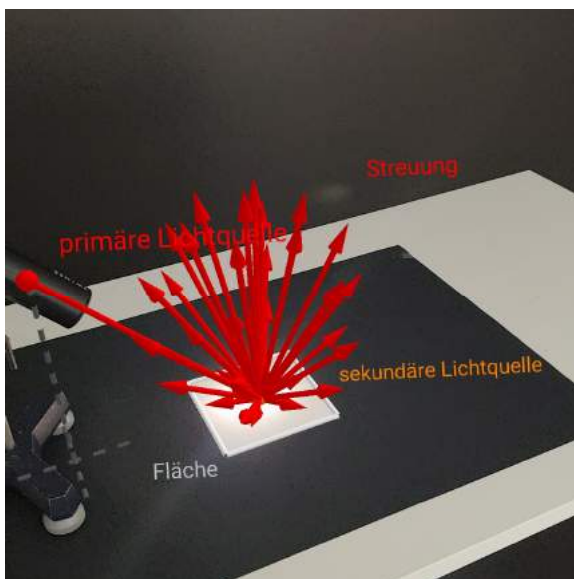


Abbildung 77: AR-Experiment zur Streuung

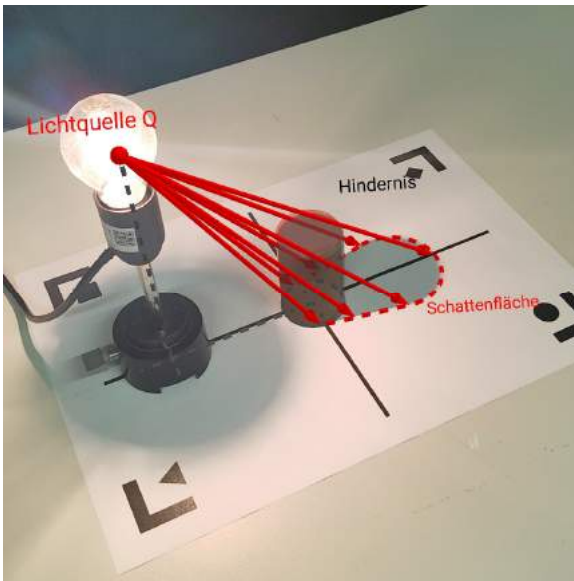


Abbildung 78: AR-Experiment zur Schattenfläche

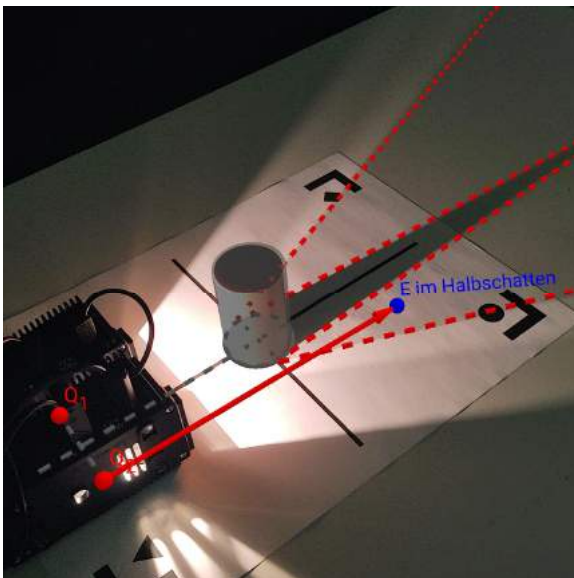


Abbildung 79: AR-Experiment zu Kern- und Halbschatten

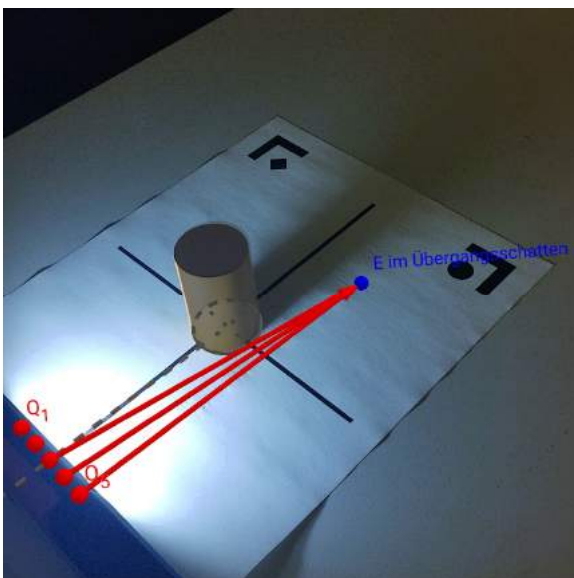


Abbildung 80: AR-Experiment zum Übergangsschatten

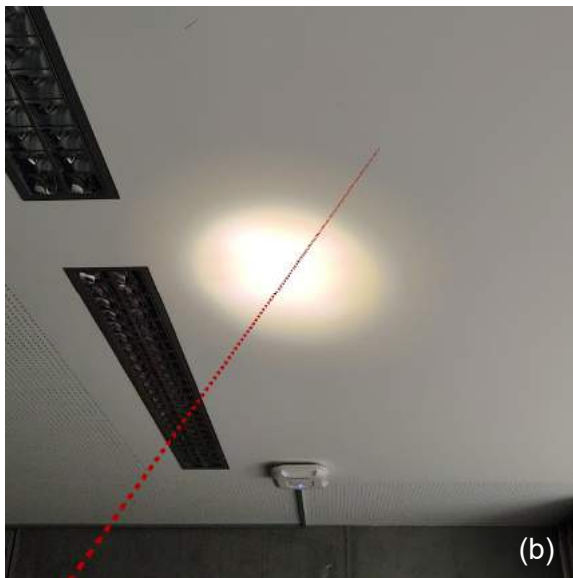
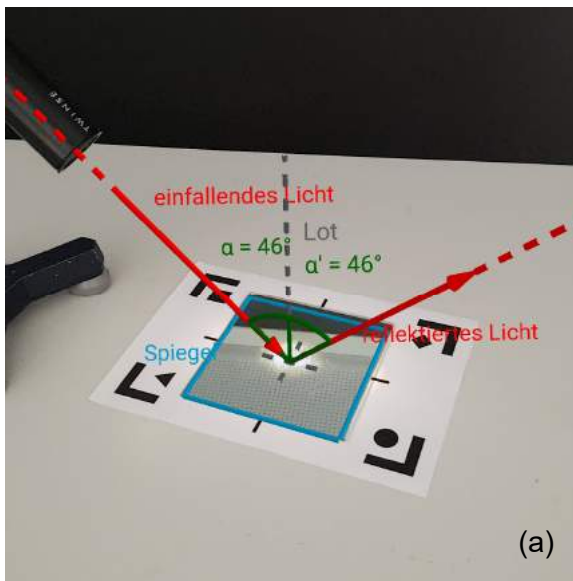


Abbildung 81: AR-Experiment zur Reflexion mit dem Blick auf (a) den Spiegel und (b) den Lichtfleck an der Decke

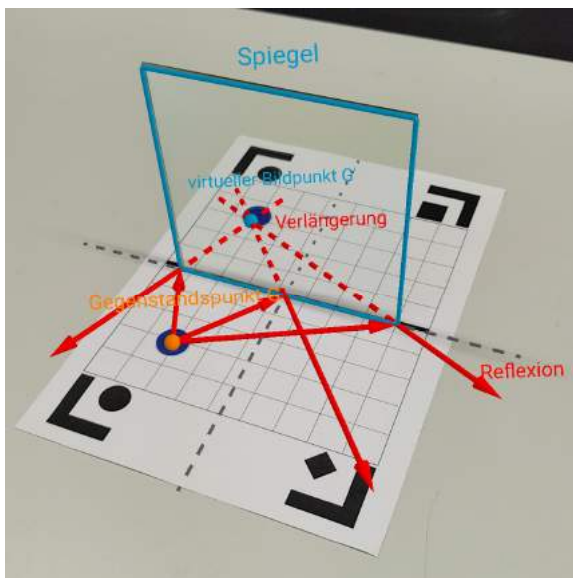


Abbildung 82: AR-Experiment zum Spiegelbild

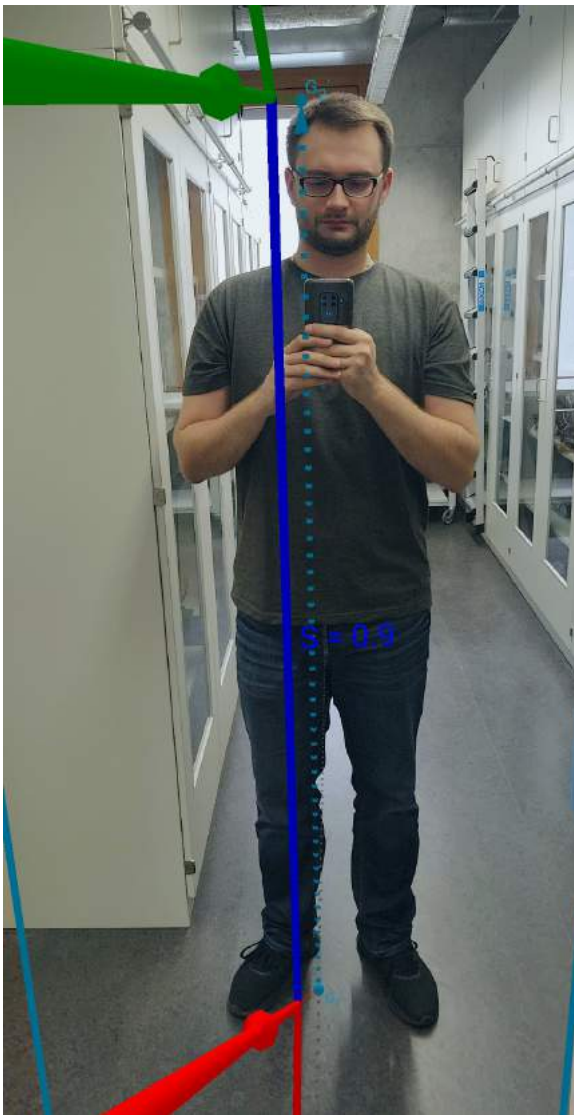


Abbildung 83: AR-Experiment zur Spiegelgröße

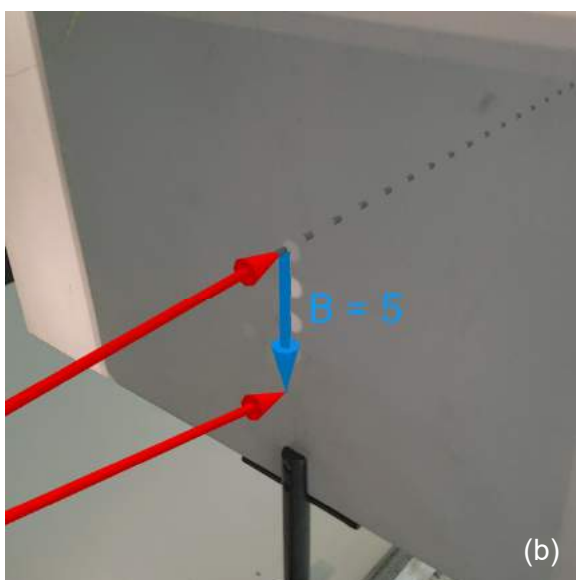
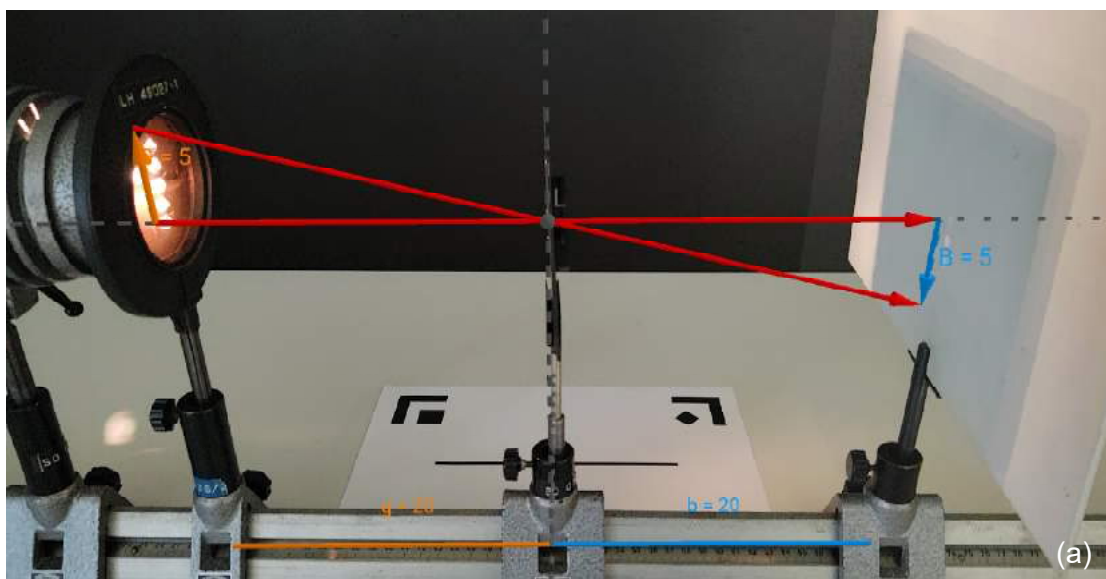


Abbildung 84: AR-Experiment zur Bildgröße mit (a) der Seitenansicht und (b) dem Blick auf den Schirm

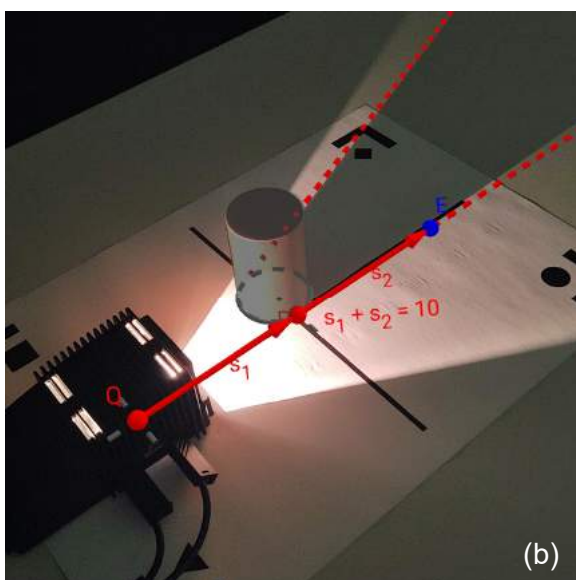
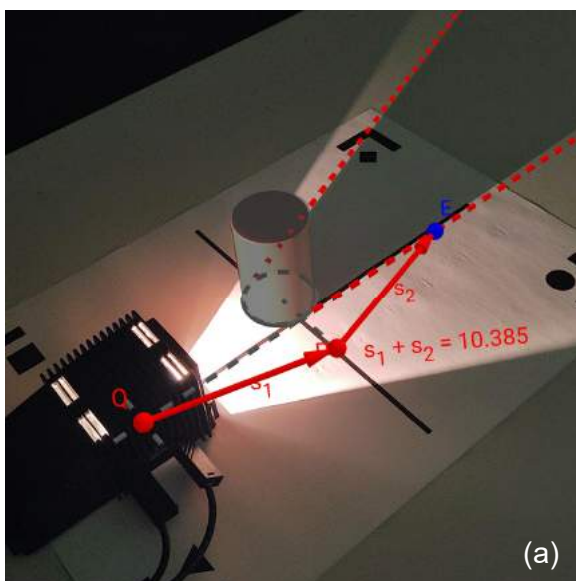


Abbildung 85: AR-Experiment zur Länge des geradlinigen Lichtwegs mit (a) einer größeren und (b) der kürzesten Weglänge

Anhang

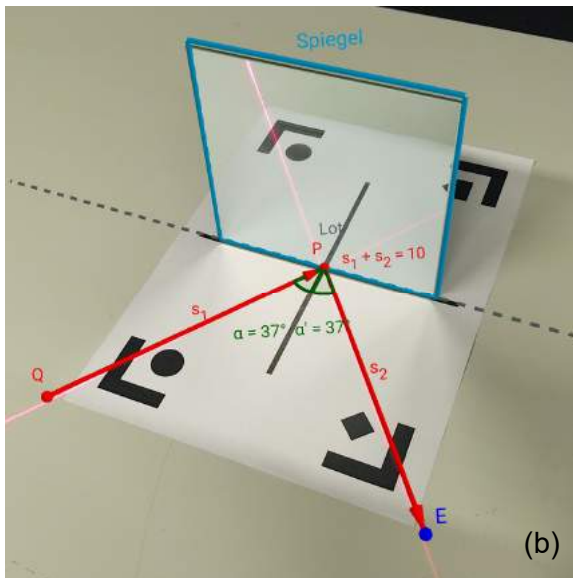
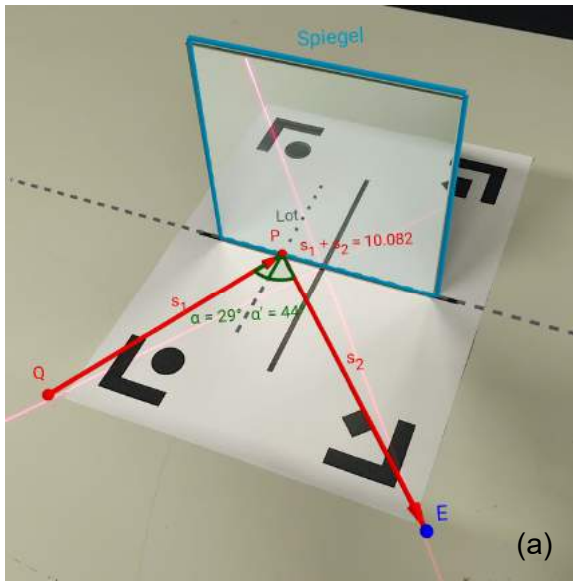


Abbildung 86: AR-Experiment zur Länge des reflektierten Lichtwegs mit (a) einer größeren und (b) der kürzesten Weglänge

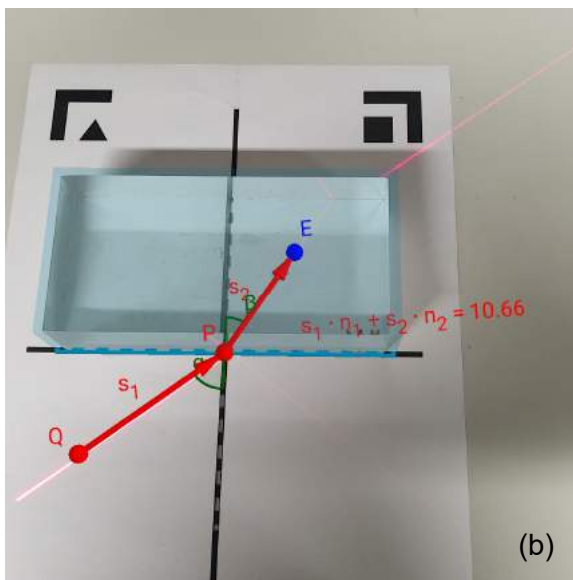
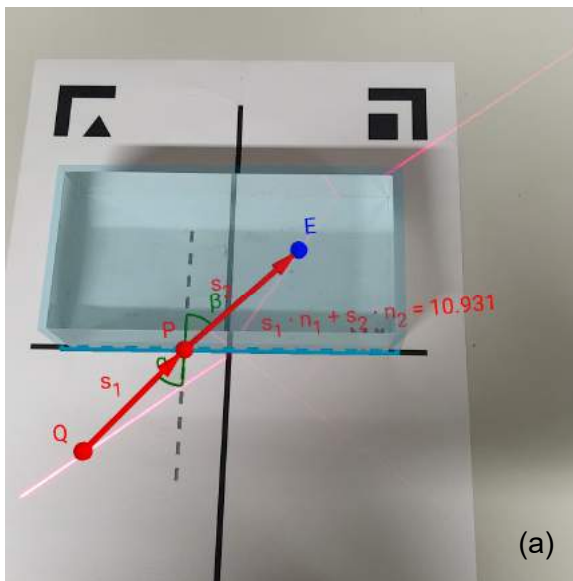


Abbildung 87: AR-Experiment zur optischen Länge des gebrochenen Lichtwegs mit (a) einer größeren und (b) der kürzesten optischen Weglänge

Anhang

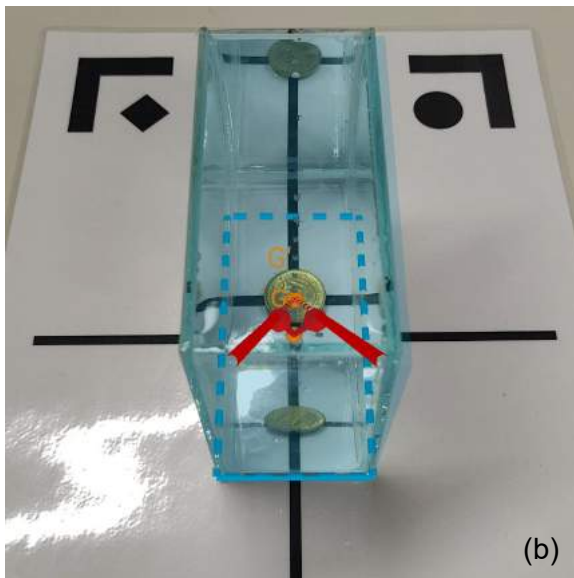
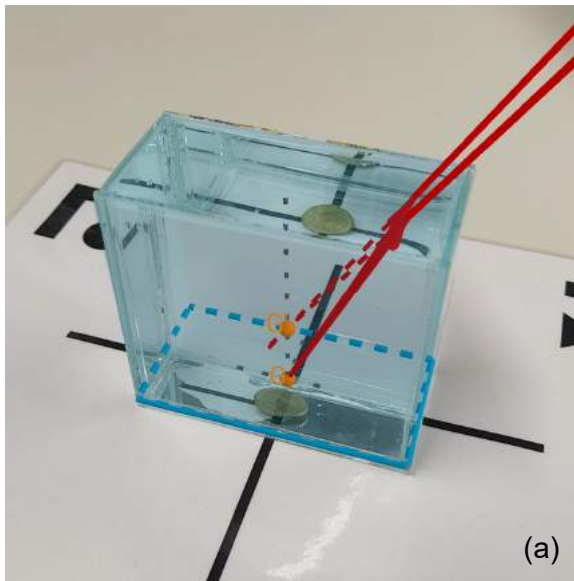


Abbildung 88: AR-Experiment zur optischen Hebung mit (a) der Seitenansicht und (b) dem Blick auf die angehobene Münze

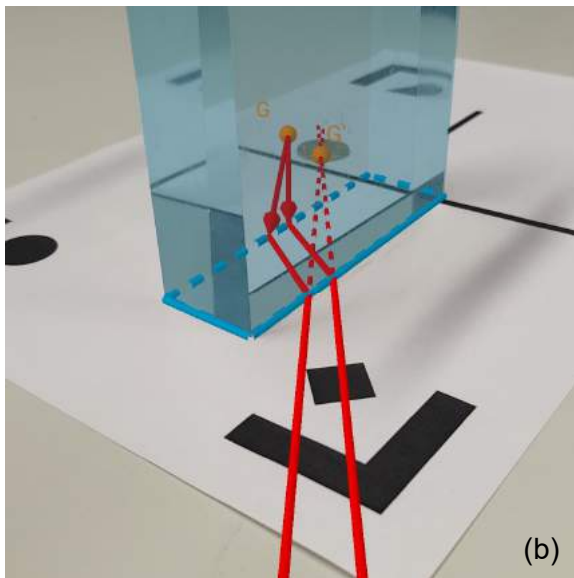
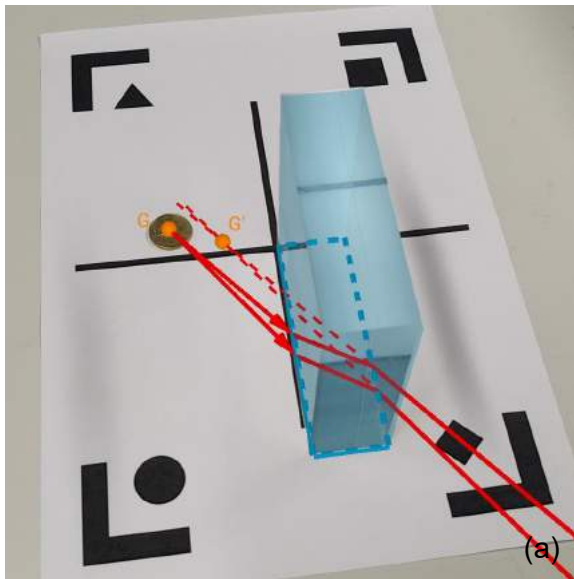


Abbildung 89: AR-Experiment zur optischen Verschiebung mit (a) dem ungehinderten Blick auf die Münze und (b) durch den Glasblock

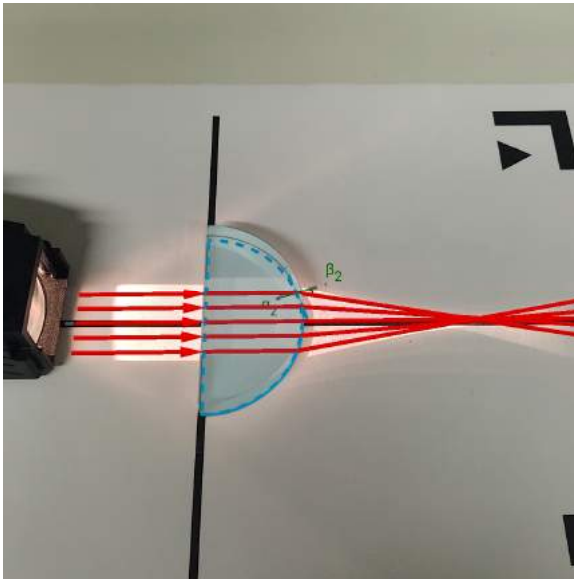


Abbildung 90: AR-Experiment zur Brechung an gekrümmten Flächen

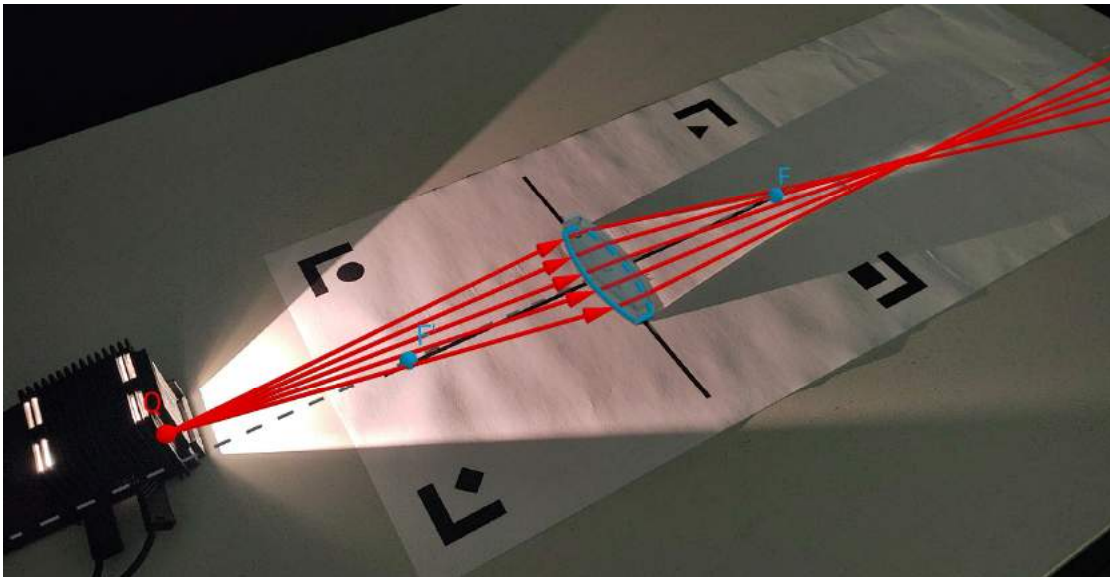


Abbildung 91: AR-Experiment zur Brechung an einer Sammellinse

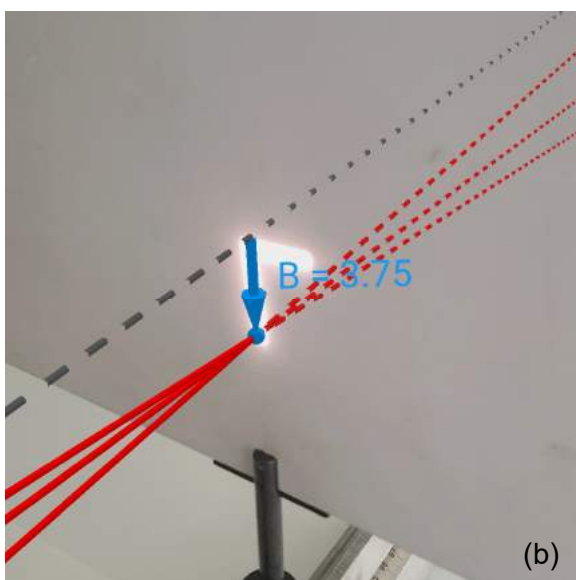
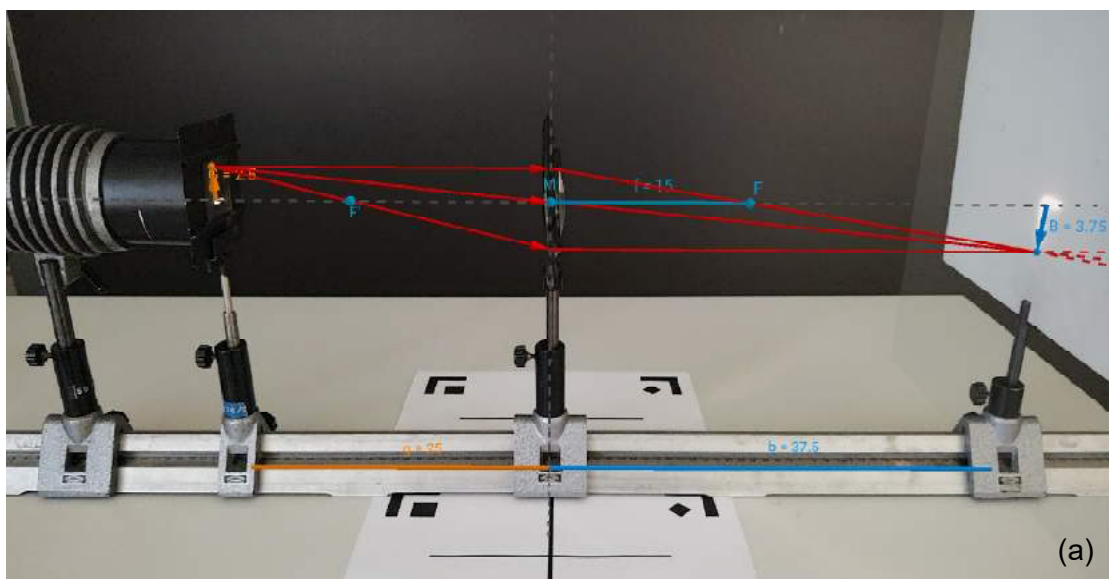


Abbildung 92: AR-Experiment zur Abbildung an einer Sammellinse mit (a) der Seitenansicht und (b) dem Blick auf den Schirm

Anhang

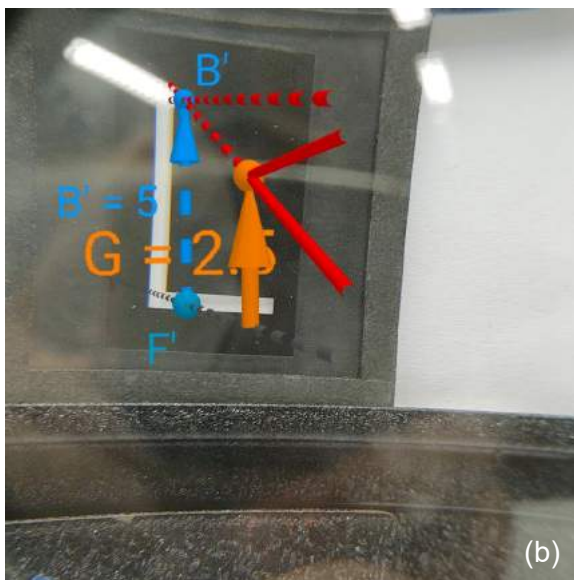
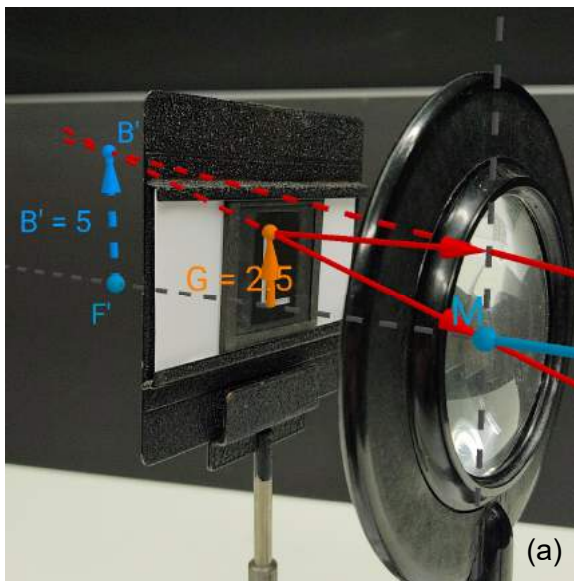


Abbildung 93: AR-Experiment zur Verwendung einer Sammellinse als Lupe mit (a) der Seitenansicht und (b) dem Blick durch die Linse

Stichwortverzeichnis

| | | | |
|--|--------|----------------------------------|-------|
| Abbildungsgesetz..... | 206 | Kompetenz..... | 21 |
| Augmented Reality..... | 64 | mental..... | 7, 19 |
| Axiom..... | 15 | Methode..... | 20 |
| Brechungsgesetz..... | 210 | Methode, phänomenbasiert..... | 23 |
| Clusteranalyse..... | 150 | Objekt..... | 9 |
| Denken | | synthetisch..... | 20 |
| beweglich..... | 39 | wissenschaftlich..... | 16 |
| Experiment..... | 51 | Modellbildung..... | 34 |
| Augmented Reality..... | 65 | Funktion..... | 33 |
| virtuell..... | 54, 62 | grafikorientiert..... | 37 |
| Geometrie | | mathematisch..... | 36 |
| dynamisch..... | 38 | Modellierung..... | 33 |
| euklidisch..... | 38 | Motivation..... | 104 |
| Gesetz..... | 16 | Optik | |
| Hypothese..... | 15 | Anfangsoptik..... | 184 |
| Idealisierung..... | 14, 74 | Geometrische..... | 204 |
| Immersion..... | 64 | Phänomen..... | 14 |
| Korrelation..... | 135 | Prinzip..... | 15 |
| Kreislauf der Erkenntnisgewinnung | 54 | Reflexionsgesetz..... | 208 |
| Linengleichung..... | 221 | Selbstwirksamkeitserwartung..... | 96 |
| Methode | | computerbezogen..... | 97 |
| deduktiv..... | 20 | experimentierbezogen..... | 96 |
| induktiv..... | 18, 26 | mathematische..... | 96 |
| Mixed-Methods..... | 93 | Simulation..... | 17 |
| Modell | | System..... | 17 |
| Begriff..... | 5 | Theorie..... | 16 |
| dynamisch..... | 62 | Vorstellung..... | 19 |
| Funktion..... | 10 | Licht..... | 185 |
| Klassifikation..... | 10 | Schatten..... | 192 |
| | | Spiegel..... | 198 |

Lebenslauf

Persönliche Angaben

Name: Albert Teichrew
Geburtsdaten: 06. Juni 1990 in Makeewka (Ukraine)

Wissenschaftlicher Werdegang

07/2017 – 10/2022 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Didaktik der Physik an der Goethe-Universität Frankfurt in der Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Roger Erb
04/2016 – 06/2017 Studentische Hilfskraft im Praktikum: Experimentelle Demonstrationen am Institut für Didaktik der Physik an der Goethe-Universität Frankfurt
04/2016 – 07/2016 Tutor im Lernraum des Instituts für Didaktik der Mathematik und der Informatik an der Goethe-Universität Frankfurt
10/2011 – 09/2016 Studium des Lehramts an Gymnasien mit den Fächern Mathematik und Physik an der Goethe-Universität Frankfurt

Praktika

07/2011 – 09/2011 Betriebspraktikum als Empfangskraft im Hotel Mainstation in Frankfurt
06/2011 – 07/2011 Orientierungspraktikum als Erzieher in der Kindertagesstätte in Crainfeld

Wehrdienst

07/2009 – 05/2011 Grundwehrdienst mit anschließendem freiwilligen Wehrdienst als Richtfunker im Luftlandefernmeldebataillon der Division Spezielle Operationen in Stadtallendorf

Schulbildung

08/2006 – 06/2009 Erreichen der allgemeinen Hochschulreife an der Alexander-von-Humboldt-Schule in Lauterbach
09/1996 – 06/2006 Erreichen der mittleren Reife im gymnasialen Zweig der Oberwaldschule in Grebenhain

Bisher erschienene Bände der Reihe „*Studien zum Physik- und Chemielernen*“

ISSN 1614-8967 (vormals *Studien zum Physiklernen* ISSN 1435-5280)

- 1 Helmut Fischler, Jochen Peuckert (Hrsg.): Concept Mapping in fachdidaktischen Forschungsprojekten der Physik und Chemie
ISBN 978-3-89722-256-4 40.50 EUR
- 2 Anja Schoster: Bedeutungsentwicklungsprozesse beim Lösen algorithmischer Physikaufgaben. *Eine Fallstudie zu Lernprozessen von Schülern im Physiknachhilfeunterricht während der Bearbeitung algorithmischer Physikaufgaben*
ISBN 978-3-89722-045-4 40.50 EUR
- 3 Claudia von Aufschnaiter: Bedeutungsentwicklungen, Interaktionen und situatives Erleben beim Bearbeiten physikalischer Aufgaben
ISBN 978-3-89722-143-7 40.50 EUR
- 4 Susanne Haerberlen: Lernprozesse im Unterricht mit Wasserstromkreisen. *Eine Fallstudie in der Sekundarstufe I*
ISBN 978-3-89722-172-7 40.50 EUR
- 5 Kerstin Haller: Über den Zusammenhang von Handlungen und Zielen. *Eine empirische Untersuchung zu Lernprozessen im physikalischen Praktikum*
ISBN 978-3-89722-242-7 40.50 EUR
- 6 Michaela Horstendahl: Motivationale Orientierungen im Physikunterricht
ISBN 978-3-89722-227-4 50.00 EUR
- 7 Stefan Deylitz: Lernergebnisse in der Quanten-Atomphysik. *Evaluation des Bremer Unterrichtskonzepts*
ISBN 978-3-89722-291-5 40.50 EUR
- 8 Lorenz Hucke: Handlungsregulation und Wissenserwerb in traditionellen und computergestützten Experimenten des physikalischen Praktikums
ISBN 978-3-89722-316-5 50.00 EUR
- 9 Heike Theyßen: Ein Physikpraktikum für Studierende der Medizin. *Darstellung der Entwicklung und Evaluation eines adressatenspezifischen Praktikums nach dem Modell der Didaktischen Rekonstruktion*
ISBN 978-3-89722-334-9 40.50 EUR
- 10 Annette Schick: Der Einfluß von Interesse und anderen selbstbezogenen Kognitionen auf Handlungen im Physikunterricht. *Fallstudien zu Interessenhandlungen im Physikunterricht*
ISBN 978-3-89722-380-6 40.50 EUR
- 11 Roland Berger: Moderne bildgebende Verfahren der medizinischen Diagnostik. *Ein Weg zu interessanterem Physikunterricht*
ISBN 978-3-89722-445-2 40.50 EUR

- 12 Johannes Werner: Vom Licht zum Atom. *Ein Unterrichtskonzept zur Quantenphysik unter Nutzung des Zeigermodells*
ISBN 978-3-89722-471-1 40.50 EUR
- 13 Florian Sander: Verbindung von Theorie und Experiment im physikalischen Praktikum. *Eine empirische Untersuchung zum handlungsbezogenen Vorverständnis und dem Einsatz grafikorientierter Modellbildung im Praktikum*
ISBN 978-3-89722-482-7 40.50 EUR
- 14 Jörn Gerdes: Der Begriff der physikalischen Kompetenz. *Zur Validierung eines Konstruktes*
ISBN 978-3-89722-510-7 40.50 EUR
- 15 Malte Meyer-Arndt: Interaktionen im Physikpraktikum zwischen Studierenden und Betreuern. *Feldstudie zu Bedeutungsentwicklungsprozessen im physikalischen Praktikum*
ISBN 978-3-89722-541-1 40.50 EUR
- 16 Dietmar Höttecke: Die Natur der Naturwissenschaften historisch verstehen. *Fachdidaktische und wissenschaftshistorische Untersuchungen*
ISBN 978-3-89722-607-4 40.50 EUR
- 17 Gil Gabriel Mavanga: Entwicklung und Evaluation eines experimentell- und phänomenorientierten Optikcurriculums. *Untersuchung zu Schülervorstellungen in der Sekundarstufe I in Mosambik und Deutschland*
ISBN 978-3-89722-721-7 40.50 EUR
- 18 Meike Ute Zastrow: Interaktive Experimentieranleitungen. *Entwicklung und Evaluation eines Konzeptes zur Vorbereitung auf das Experimentieren mit Messgeräten im Physikalischen Praktikum*
ISBN 978-3-89722-802-3 40.50 EUR
- 19 Gunnar Friege: Wissen und Problemlösen. *Eine empirische Untersuchung des wissenszentrierten Problemlösens im Gebiet der Elektrizitätslehre auf der Grundlage des Experten-Novizen-Vergleichs*
ISBN 978-3-89722-809-2 40.50 EUR
- 20 Erich Starauschek: Physikunterricht nach dem Karlsruher Physikkurs. *Ergebnisse einer Evaluationsstudie*
ISBN 978-3-89722-823-8 40.50 EUR
- 21 Roland Paatz: Charakteristika analogiebasierten Denkens. *Vergleich von Lernprozessen in Basis- und Zielbereich*
ISBN 978-3-89722-944-0 40.50 EUR
- 22 Silke Mikelskis-Seifert: Die Entwicklung von Metakzepten zur Teilchenvorstellung bei Schülern. *Untersuchung eines Unterrichts über Modelle mithilfe eines Systems multipler Repräsentationsebenen*
ISBN 978-3-8325-0013-9 40.50 EUR
- 23 Brunhild Landwehr: Distanzen von Lehrkräften und Studierenden des Sachunterrichts zur Physik. *Eine qualitativ-empirische Studie zu den Ursachen*
ISBN 978-3-8325-0044-3 40.50 EUR

- 24 Lydia Murmann: Physiklernen zu Licht, Schatten und Sehen. *Eine phänomenografische Untersuchung in der Primarstufe*
ISBN 978-3-8325-0060-3 40.50 EUR
- 25 Thorsten Bell: Strukturprinzipien der Selbstregulation. *Komplexe Systeme, Elementarisierungen und Lernprozessstudien für den Unterricht der Sekundarstufe II*
ISBN 978-3-8325-0134-1 40.50 EUR
- 26 Rainer Müller: Quantenphysik in der Schule
ISBN 978-3-8325-0186-0 40.50 EUR
- 27 Jutta Roth: Bedeutungsentwicklungsprozesse von Physikerinnen und Physikern in den Dimensionen Komplexität, Zeit und Inhalt
ISBN 978-3-8325-0183-9 40.50 EUR
- 28 Andreas Saniter: Spezifika der Verhaltensmuster fortgeschrittener Studierender der Physik
ISBN 978-3-8325-0292-8 40.50 EUR
- 29 Thomas Weber: Kumulatives Lernen im Physikunterricht. *Eine vergleichende Untersuchung in Unterrichtsgängen zur geometrischen Optik*
ISBN 978-3-8325-0316-1 40.50 EUR
- 30 Markus Rehm: Über die Chancen und Grenzen moralischer Erziehung im naturwissenschaftlichen Unterricht
ISBN 978-3-8325-0368-0 40.50 EUR
- 31 Marion Budde: Lernwirkungen in der Quanten-Atom-Physik. *Fallstudien über Resonanzen zwischen Lernangeboten und SchülerInnen-Vorstellungen*
ISBN 978-3-8325-0483-0 40.50 EUR
- 32 Thomas Reyer: Oberflächenmerkmale und Tiefenstrukturen im Unterricht. *Exemplarische Analysen im Physikunterricht der gymnasialen Sekundarstufe*
ISBN 978-3-8325-0488-5 40.50 EUR
- 33 Christoph Thomas Müller: Subjektive Theorien und handlungsleitende Kognitionen von Lehrern als Determinanten schulischer Lehr-Lern-Prozesse im Physikunterricht
ISBN 978-3-8325-0543-1 40.50 EUR
- 34 Gabriela Jonas-Ahrend: Physiklehrvorstellungen zum Experiment im Physikunterricht
ISBN 978-3-8325-0576-9 40.50 EUR
- 35 Dimitrios Stavrou: Das Zusammenspiel von Zufall und Gesetzmäßigkeiten in der nicht-linearen Dynamik. *Didaktische Analyse und Lernprozesse*
ISBN 978-3-8325-0609-4 40.50 EUR
- 36 Katrin Engeln: Schülerlabors: authentische, aktivierende Lernumgebungen als Möglichkeit, Interesse an Naturwissenschaften und Technik zu wecken
ISBN 978-3-8325-0689-6 40.50 EUR
- 37 Susann Hartmann: Erklärungsvielfalt
ISBN 978-3-8325-0730-5 40.50 EUR

- 38 Knut Neumann: Didaktische Rekonstruktion eines physikalischen Praktikums für Physiker
ISBN 978-3-8325-0762-6 40.50 EUR
- 39 Michael Späth: Kontextbedingungen für Physikunterricht an der Hauptschule. *Möglichkeiten und Ansatzpunkte für einen fachübergreifenden, handlungsorientierten und berufsorientierten Unterricht*
ISBN 978-3-8325-0827-2 40.50 EUR
- 40 Jörg Hirsch: Interesse, Handlungen und situatives Erleben von Schülerinnen und Schülern beim Bearbeiten physikalischer Aufgaben
ISBN 978-3-8325-0875-3 40.50 EUR
- 41 Monika Hüther: Evaluation einer hypermedialen Lernumgebung zum Thema Gasgesetze. *Eine Studie im Rahmen des Physikpraktikums für Studierende der Medizin*
ISBN 978-3-8325-0911-8 40.50 EUR
- 42 Maike Tesch: Das Experiment im Physikunterricht. *Didaktische Konzepte und Ergebnisse einer Videostudie*
ISBN 978-3-8325-0975-0 40.50 EUR
- 43 Nina Nicolai: Skriptgeleitete Eltern-Kind-Interaktion bei Chemiehausaufgaben. *Eine Evaluationsstudie im Themenbereich Säure-Base*
ISBN 978-3-8325-1013-8 40.50 EUR
- 44 Antje Leisner: Entwicklung von Modellkompetenz im Physikunterricht
ISBN 978-3-8325-1020-6 40.50 EUR
- 45 Stefan Rumann: Evaluation einer Interventionsstudie zur Säure-Base-Thematik
ISBN 978-3-8325-1027-5 40.50 EUR
- 46 Thomas Wilhelm: Konzeption und Evaluation eines Kinematik/Dynamik-Lehrgangs zur Veränderung von Schülervorstellungen mit Hilfe dynamisch ikonischer Repräsentationen und graphischer Modellbildung – mit CD-ROM
ISBN 978-3-8325-1046-6 45.50 EUR
- 47 Andrea Maier-Richter: Computerunterstütztes Lernen mit Lösungsbeispielen in der Chemie. *Eine Evaluationsstudie im Themenbereich Löslichkeit*
ISBN 978-3-8325-1046-6 40.50 EUR
- 48 Jochen Peuckert: Stabilität und Ausprägung kognitiver Strukturen zum Atombegriff
ISBN 978-3-8325-1104-3 40.50 EUR
- 49 Maik Walpuski: Optimierung von experimenteller Kleingruppenarbeit durch Strukturierungshilfen und Feedback
ISBN 978-3-8325-1184-5 40.50 EUR
- 50 Helmut Fischler, Christiane S. Reiners (Hrsg.): Die Teilchenstruktur der Materie im Physik- und Chemieunterricht
ISBN 978-3-8325-1225-5 34.90 EUR
- 51 Claudia Eysel: Interdisziplinäres Lehren und Lernen in der Lehrerbildung. *Eine empirische Studie zum Kompetenzerwerb in einer komplexen Lernumgebung*
ISBN 978-3-8325-1238-5 40.50 EUR

- 52 Johannes Günther: Lehrerfortbildung über die Natur der Naturwissenschaften. *Studien über das Wissenschaftsverständnis von Grundschullehrkräften*
ISBN 978-3-8325-1287-3 40.50 EUR
- 53 Christoph Neugebauer: Lernen mit Simulationen und der Einfluss auf das Problemlösen in der Physik
ISBN 978-3-8325-1300-9 40.50 EUR
- 54 Andreas Schnirch: Gendergerechte Interessen- und Motivationsförderung im Kontext naturwissenschaftlicher Grundbildung. *Konzeption, Entwicklung und Evaluation einer multimedial unterstützten Lernumgebung*
ISBN 978-3-8325-1334-4 40.50 EUR
- 55 Hilde Köster: Freies Explorieren und Experimentieren. *Eine Untersuchung zur selbstbestimmten Gewinnung von Erfahrungen mit physikalischen Phänomenen im Sachunterricht*
ISBN 978-3-8325-1348-1 40.50 EUR
- 56 Eva Heran-Dörr: Entwicklung und Evaluation einer Lehrerfortbildung zur Förderung der physikdidaktischen Kompetenz von Sachunterrichtslehrkräften
ISBN 978-3-8325-1377-1 40.50 EUR
- 57 Agnes Szabone Varnai: Unterstützung des Problemlösens in Physik durch den Einsatz von Simulationen und die Vorgabe eines strukturierten Kooperationsformats
ISBN 978-3-8325-1403-7 40.50 EUR
- 58 Johannes Rethfeld: Aufgabenbasierte Lernprozesse in selbstorganisationsoffenem Unterricht der Sekundarstufe I zum Themengebiet ELEKTROSTATIK. *Eine Feldstudie in vier 10. Klassen zu einer kartenbasierten Lernumgebung mit Aufgaben aus der Elektrostatik*
ISBN 978-3-8325-1416-7 40.50 EUR
- 59 Christian Henke: Experimentell-naturwissenschaftliche Arbeitsweisen in der Oberstufe. *Untersuchung am Beispiel des HIGHSEA-Projekts in Bremerhaven*
ISBN 978-3-8325-1515-7 40.50 EUR
- 60 Lutz Kasper: Diskursiv-narrative Elemente für den Physikunterricht. *Entwicklung und Evaluation einer multimedialen Lernumgebung zum Erdmagnetismus*
ISBN 978-3-8325-1537-9 40.50 EUR
- 61 Thorid Rabe: Textgestaltung und Aufforderung zu Selbsterklärungen beim Physiklernen mit Multimedia
ISBN 978-3-8325-1539-3 40.50 EUR
- 62 Ina Glemnitz: Vertikale Vernetzung im Chemieunterricht. *Ein Vergleich von traditionellem Unterricht mit Unterricht nach Chemie im Kontext*
ISBN 978-3-8325-1628-4 40.50 EUR
- 63 Erik Einhaus: Schülerkompetenzen im Bereich Wärmelehre. *Entwicklung eines Testinstruments zur Überprüfung und Weiterentwicklung eines normativen Modells fachbezogener Kompetenzen*
ISBN 978-3-8325-1630-7 40.50 EUR

- 64 Jasmin Neuroth: Concept Mapping als Lernstrategie. *Eine Interventionsstudie zum Chemielernen aus Texten*
ISBN 978-3-8325-1659-8 40.50 EUR
- 65 Hans Gerd Hegeler-Burkhart: Zur Kommunikation von Hauptschülerinnen und Hauptschülern in einem handlungsorientierten und fächerübergreifenden Unterricht mit physikalischen und technischen Inhalten
ISBN 978-3-8325-1667-3 40.50 EUR
- 66 Karsten Rincke: Sprachentwicklung und Fachlernen im Mechanikunterricht. *Sprache und Kommunikation bei der Einführung in den Kraftbegriff*
ISBN 978-3-8325-1699-4 40.50 EUR
- 67 Nina Strehle: Das Ion im Chemieunterricht. *Alternative Schülervorstellungen und curriculare Konsequenzen*
ISBN 978-3-8325-1710-6 40.50 EUR
- 68 Martin Hopf: Problemorientierte Schülerexperimente
ISBN 978-3-8325-1711-3 40.50 EUR
- 69 Anne Beerenwinkel: Fostering conceptual change in chemistry classes using expository texts
ISBN 978-3-8325-1721-2 40.50 EUR
- 70 Roland Berger: Das Gruppenpuzzle im Physikunterricht der Sekundarstufe II. *Eine empirische Untersuchung auf der Grundlage der Selbstbestimmungstheorie der Motivation*
ISBN 978-3-8325-1732-8 40.50 EUR
- 71 Giuseppe Colicchia: Physikunterricht im Kontext von Medizin und Biologie. *Entwicklung und Erprobung von Unterrichtseinheiten*
ISBN 978-3-8325-1746-5 40.50 EUR
- 72 Sandra Winheller: Geschlechtsspezifische Auswirkungen der Lehrer-Schüler-Interaktion im Chemieanfangsunterricht
ISBN 978-3-8325-1757-1 40.50 EUR
- 73 Isabel Wahser: Training von naturwissenschaftlichen Arbeitsweisen zur Unterstützung experimenteller Kleingruppenarbeit im Fach Chemie
ISBN 978-3-8325-1815-8 40.50 EUR
- 74 Claus Brell: Lernmedien und Lernerfolg - reale und virtuelle Materialien im Physikunterricht. *Empirische Untersuchungen in achten Klassen an Gymnasien (Laborstudie) zum Computereinsatz mit Simulation und IBE*
ISBN 978-3-8325-1829-5 40.50 EUR
- 75 Rainer Wackermann: Überprüfung der Wirksamkeit eines Basismodell-Trainings für Physiklehrer
ISBN 978-3-8325-1882-0 40.50 EUR
- 76 Oliver Tepner: Effektivität von Aufgaben im Chemieunterricht der Sekundarstufe I
ISBN 978-3-8325-1919-3 40.50 EUR

- 77 Claudia Geyer: Museums- und Science-Center-Besuche im naturwissenschaftlichen Unterricht aus einer motivationalen Perspektive. *Die Sicht von Lehrkräften und Schülerinnen und Schülern*
ISBN 978-3-8325-1922-3 40.50 EUR
- 78 Tobias Leonhard: Professionalisierung in der Lehrerbildung. *Eine explorative Studie zur Entwicklung professioneller Kompetenzen in der Lehrererstausbildung*
ISBN 978-3-8325-1924-7 40.50 EUR
- 79 Alexander Kauertz: Schwierigkeitserzeugende Merkmale physikalischer Leistungstestaufgaben
ISBN 978-3-8325-1925-4 40.50 EUR
- 80 Regina Hübinger: Schüler auf Weltreise. *Entwicklung und Evaluation von Lehr-/Lernmaterialien zur Förderung experimentell-naturwissenschaftlicher Kompetenzen für die Jahrgangsstufen 5 und 6*
ISBN 978-3-8325-1932-2 40.50 EUR
- 81 Christine Waltner: Physik lernen im Deutschen Museum
ISBN 978-3-8325-1933-9 40.50 EUR
- 82 Torsten Fischer: Handlungsmuster von Physiklehrkräften beim Einsatz neuer Medien. *Fallstudien zur Unterrichtspraxis*
ISBN 978-3-8325-1948-3 42.00 EUR
- 83 Corinna Kieren: Chemiehausaufgaben in der Sekundarstufe I des Gymnasiums. *Fragebogenerhebung zur gegenwärtigen Praxis und Entwicklung eines optimierten Hausaufgabendesigns im Themenbereich Säure-Base*
978-3-8325-1975-9 37.00 EUR
- 84 Marco Thiele: Modelle der Thermohalinen Zirkulation im Unterricht. *Eine empirische Studie zur Förderung des Modellverständnisses*
ISBN 978-3-8325-1982-7 40.50 EUR
- 85 Bernd Zinn: Physik lernen, um Physik zu lehren. *Eine Möglichkeit für interessanteren Physikunterricht*
ISBN 978-3-8325-1995-7 39.50 EUR
- 86 Esther Klaes: Außerschulische Lernorte im naturwissenschaftlichen Unterricht. *Die Perspektive der Lehrkraft*
ISBN 978-3-8325-2006-9 43.00 EUR
- 87 Marita Schmidt: Kompetenzmodellierung und -diagnostik im Themengebiet Energie der Sekundarstufe I. *Entwicklung und Erprobung eines Testinventars*
ISBN 978-3-8325-2024-3 37.00 EUR
- 88 Gudrun Franke-Braun: Aufgaben mit gestuften Lernhilfen. *Ein Aufgabenformat zur Förderung der sachbezogenen Kommunikation und Lernleistung für den naturwissenschaftlichen Unterricht*
ISBN 978-3-8325-2026-7 38.00 EUR
- 89 Silke Klos: Kompetenzförderung im naturwissenschaftlichen Anfangsunterricht. *Der Einfluss eines integrierten Unterrichtskonzepts*
ISBN 978-3-8325-2133-2 37.00 EUR

- 90 Ulrike Elisabeth Burkard: Quantenphysik in der Schule. *Bestandsaufnahme, Perspektiven und Weiterentwicklungsmöglichkeiten durch die Implementation eines Medienservers*
ISBN 978-3-8325-2215-5 43.00 EUR
- 91 Ulrike Gromadecki: Argumente in physikalischen Kontexten. *Welche Geltungsgründe halten Physikanfänger für überzeugend?*
ISBN 978-3-8325-2250-6 41.50 EUR
- 92 Jürgen Bruns: Auf dem Weg zur Förderung naturwissenschaftsspezifischer Vorstellungen von zukünftigen Chemie-Lehrenden
ISBN 978-3-8325-2257-5 43.50 EUR
- 93 Cornelius Marsch: Räumliche Atomvorstellung. *Entwicklung und Erprobung eines Unterrichtskonzeptes mit Hilfe des Computers*
ISBN 978-3-8325-2293-3 82.50 EUR
- 94 Maja Brückmann: Sachstrukturen im Physikunterricht. *Ergebnisse einer Videostudie*
ISBN 978-3-8325-2272-8 39.50 EUR
- 95 Sabine Fechner: Effects of Context-oriented Learning on Student Interest and Achievement in Chemistry Education
ISBN 978-3-8325-2343-5 36.50 EUR
- 96 Clemens Nagel: eLearning im Physikalischen Anfängerpraktikum
ISBN 978-3-8325-2355-8 39.50 EUR
- 97 Josef Riese: Professionelles Wissen und professionelle Handlungskompetenz von (angehenden) Physiklehrkräften
ISBN 978-3-8325-2376-3 39.00 EUR
- 98 Sascha Bernholt: Kompetenzmodellierung in der Chemie. *Theoretische und empirische Reflexion am Beispiel des Modells hierarchischer Komplexität*
ISBN 978-3-8325-2447-0 40.00 EUR
- 99 Holger Christoph Stawitz: Auswirkung unterschiedlicher Aufgabenprofile auf die Schülerleistung. *Vergleich von Naturwissenschafts- und Problemlöseaufgaben der PISA 2003-Studie*
ISBN 978-3-8325-2451-7 37.50 EUR
- 100 Hans Ernst Fischer, Elke Sumfleth (Hrsg.): nwu-essen – 10 Jahre Essener Forschung zum naturwissenschaftlichen Unterricht
ISBN 978-3-8325-3331-1 40.00 EUR
- 101 Hendrik Härtig: Sachstrukturen von Physikschulbüchern als Grundlage zur Bestimmung der Inhaltsvalidität eines Tests
ISBN 978-3-8325-2512-5 34.00 EUR
- 102 Thomas Grüß-Niehaus: Zum Verständnis des Löslichkeitskonzeptes im Chemieunterricht. *Der Effekt von Methoden progressiver und kollaborativer Reflexion*
ISBN 978-3-8325-2537-8 40.50 EUR

- 103 Patrick Bronner: Quantenoptische Experimente als Grundlage eines Curriculums zur Quantenphysik des Photons
ISBN 978-3-8325-2540-8 36.00 EUR
- 104 Adrian Voßkühler: Blickbewegungsmessung an Versuchsaufbauten. *Studien zur Wahrnehmung, Verarbeitung und Usability von physikbezogenen Experimenten am Bildschirm und in der Realität*
ISBN 978-3-8325-2548-4 47.50 EUR
- 105 Verena Tobias: Newton'sche Mechanik im Anfangsunterricht. *Die Wirksamkeit einer Einführung über die zweidimensionale Dynamik auf das Lehren und Lernen*
ISBN 978-3-8325-2558-3 54.00 EUR
- 106 Christian Rogge: Entwicklung physikalischer Konzepte in aufgabenbasierten Lernumgebungen
ISBN 978-3-8325-2574-3 45.00 EUR
- 107 Mathias Ropohl: Modellierung von Schülerkompetenzen im Basiskonzept Chemische Reaktion. *Entwicklung und Analyse von Testaufgaben*
ISBN 978-3-8325-2609-2 36.50 EUR
- 108 Christoph Kulgemeyer: Physikalische Kommunikationskompetenz. *Modellierung und Diagnostik*
ISBN 978-3-8325-2674-0 44.50 EUR
- 109 Jennifer Olszewski: The Impact of Physics Teachers' Pedagogical Content Knowledge on Teacher Actions and Student Outcomes
ISBN 978-3-8325-2680-1 33.50 EUR
- 110 Annika Ohle: Primary School Teachers' Content Knowledge in Physics and its Impact on Teaching and Students' Achievement
ISBN 978-3-8325-2684-9 36.50 EUR
- 111 Susanne Mannel: Assessing scientific inquiry. *Development and evaluation of a test for the low-performing stage*
ISBN 978-3-8325-2761-7 40.00 EUR
- 112 Michael Plomer: Physik physiologisch passend praktiziert. *Eine Studie zur Lernwirksamkeit von traditionellen und adressatenspezifischen Physikpraktika für die Physiologie*
ISBN 978-3-8325-2804-1 34.50 EUR
- 113 Alexandra Schulz: Experimentierspezifische Qualitätsmerkmale im Chemieunterricht. *Eine Videostudie*
ISBN 978-3-8325-2817-1 40.00 EUR
- 114 Franz Boczianowski: Eine empirische Untersuchung zu Vektoren im Physikunterricht der Mittelstufe
ISBN 978-3-8325-2843-0 39.50 EUR
- 115 Maria Ploog: Internetbasiertes Lernen durch Textproduktion im Fach Physik
ISBN 978-3-8325-2853-9 39.50 EUR

- 116 Anja Dhein: Lernen in Explorier- und Experimentiersituationen. *Eine explorative Studie zu Bedeutungsentwicklungsprozessen bei Kindern im Alter zwischen 4 und 6 Jahren*
ISBN 978-3-8325-2859-1 45.50 EUR
- 117 Irene Neumann: Beyond Physics Content Knowledge. *Modeling Competence Regarding Nature of Scientific Inquiry and Nature of Scientific Knowledge*
ISBN 978-3-8325-2880-5 37.00 EUR
- 118 Markus Emden: Prozessorientierte Leistungsmessung des naturwissenschaftlich-experimentellen Arbeitens. *Eine vergleichende Studie zu Diagnoseinstrumenten zu Beginn der Sekundarstufe I*
ISBN 978-3-8325-2867-6 38.00 EUR
- 119 Birgit Hofmann: Analyse von Blickbewegungen von Schülern beim Lesen von physikbezogenen Texten mit Bildern. *Eye Tracking als Methodenwerkzeug in der physikdidaktischen Forschung*
ISBN 978-3-8325-2925-3 59.00 EUR
- 120 Rebecca Knobloch: Analyse der fachinhaltlichen Qualität von Schüleräußerungen und deren Einfluss auf den Lernerfolg. *Eine Videostudie zu kooperativer Kleingruppenarbeit*
ISBN 978-3-8325-3006-8 36.50 EUR
- 121 Julia Hostenbach: Entwicklung und Prüfung eines Modells zur Beschreibung der Bewertungskompetenz im Chemieunterricht
ISBN 978-3-8325-3013-6 38.00 EUR
- 122 Anna Windt: Naturwissenschaftliches Experimentieren im Elementarbereich. *Evaluation verschiedener Lernsituationen*
ISBN 978-3-8325-3020-4 43.50 EUR
- 123 Eva Kölbach: Kontexteinflüsse beim Lernen mit Lösungsbeispielen
ISBN 978-3-8325-3025-9 38.50 EUR
- 124 Anna Lau: Passung und vertikale Vernetzung im Chemie- und Physikunterricht
ISBN 978-3-8325-3021-1 36.00 EUR
- 125 Jan Lamprecht: Ausbildungswege und Komponenten professioneller Handlungskompetenz. *Vergleich von Quereinsteigern mit Lehramtsabsolventen für Gymnasien im Fach Physik*
ISBN 978-3-8325-3035-8 38.50 EUR
- 126 Ulrike Böhm: Förderung von Verstehensprozessen unter Einsatz von Modellen
ISBN 978-3-8325-3042-6 41.00 EUR
- 127 Sabrina Dollny: Entwicklung und Evaluation eines Testinstruments zur Erfassung des fachspezifischen Professionswissens von Chemielehrkräften
ISBN 978-3-8325-3046-4 37.00 EUR
- 128 Monika Zimmermann: Naturwissenschaftliche Bildung im Kindergarten. *Eine integrative Längsschnittstudie zur Kompetenzentwicklung von Erzieherinnen*
ISBN 978-3-8325-3053-2 54.00 EUR

- 129 Ulf Saballus: Über das Schlussfolgern von Schülerinnen und Schülern zu öffentlichen Kontroversen mit naturwissenschaftlichem Hintergrund. *Eine Fallstudie*
ISBN 978-3-8325-3086-0 39.50 EUR
- 130 Olaf Krey: Zur Rolle der Mathematik in der Physik. *Wissenschaftstheoretische Aspekte und Vorstellungen Physiklernender*
ISBN 978-3-8325-3101-0 46.00 EUR
- 131 Angelika Wolf: Zusammenhänge zwischen der Eigenständigkeit im Physikunterricht, der Motivation, den Grundbedürfnissen und dem Lernerfolg von Schülern
ISBN 978-3-8325-3161-4 45.00 EUR
- 132 Johannes Börlin: Das Experiment als Lerngelegenheit. *Vom interkulturellen Vergleich des Physikunterrichts zu Merkmalen seiner Qualität*
ISBN 978-3-8325-3170-6 45.00 EUR
- 133 Olaf Uhden: Mathematisches Denken im Physikunterricht. *Theorieentwicklung und Problemanalyse*
ISBN 978-3-8325-3170-6 45.00 EUR
- 134 Christoph Gut: Modellierung und Messung experimenteller Kompetenz. *Analyse eines large-scale Experimentiertests*
ISBN 978-3-8325-3213-0 40.00 EUR
- 135 Antonio Rueda: Lernen mit ExploMultimedial in kolumbianischen Schulen. *Analyse von kurzzeitigen Lernprozessen und der Motivation beim länderübergreifenden Einsatz einer deutschen computergestützten multimedialen Lernumgebung für den naturwissenschaftlichen Unterricht*
ISBN 978-3-8325-3218-5 45.50 EUR
- 136 Krisztina Berger: Bilder, Animationen und Notizen. *Empirische Untersuchung zur Wirkung einfacher visueller Repräsentationen und Notizen auf den Wissenserwerb in der Optik*
ISBN 978-3-8325-3238-3 41.50 EUR
- 137 Antony Crossley: Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher physikalischer Konzepte auf den Wissenserwerb in der Thermodynamik der Sekundarstufe I
ISBN 978-3-8325-3275-8 40.00 EUR
- 138 Tobias Viering: Entwicklung physikalischer Kompetenz in der Sekundarstufe I. *Validierung eines Kompetenzentwicklungsmodells für das Energiekonzept im Bereich Fachwissen*
ISBN 978-3-8325-3277-2 37.00 EUR
- 139 Nico Schreiber: Diagnostik experimenteller Kompetenz. *Validierung technologiegestützter Testverfahren im Rahmen eines Kompetenzstrukturmodells*
ISBN 978-3-8325-3284-0 39.00 EUR
- 140 Sarah Hundertmark: Einblicke in kollaborative Lernprozesse. *Eine Fallstudie zur reflektierenden Zusammenarbeit unterstützt durch die Methoden Concept Mapping und Lernbegleitbogen*
ISBN 978-3-8325-3251-2 43.00 EUR

- 141 Ronny Scherer: Analyse der Struktur, Messinvarianz und Ausprägung komplexer Problemlösekompetenz im Fach Chemie. *Eine Querschnittstudie in der Sekundarstufe I und am Übergang zur Sekundarstufe II*
ISBN 978-3-8325-3312-0 43.00 EUR
- 142 Patricia Heitmann: Bewertungskompetenz im Rahmen naturwissenschaftlicher Problemlöseprozesse. *Modellierung und Diagnose der Kompetenzen Bewertung und analytisches Problemlösen für das Fach Chemie*
ISBN 978-3-8325-3314-4 37.00 EUR
- 143 Jan Fleischhauer: Wissenschaftliches Argumentieren und Entwicklung von Konzepten beim Lernen von Physik
ISBN 978-3-8325-3325-0 35.00 EUR
- 144 Nermin Özcan: Zum Einfluss der Fachsprache auf die Leistung im Fach Chemie. *Eine Förderstudie zur Fachsprache im Chemieunterricht*
ISBN 978-3-8325-3328-1 36.50 EUR
- 145 Helena van Vorst: Kontextmerkmale und ihr Einfluss auf das Schülerinteresse im Fach Chemie
ISBN 978-3-8325-3321-2 38.50 EUR
- 146 Janine Cappell: Fachspezifische Diagnosekompetenz angehender Physiklehrkräfte in der ersten Ausbildungsphase
ISBN 978-3-8325-3356-4 38.50 EUR
- 147 Susanne Bley: Förderung von Transferprozessen im Chemieunterricht
ISBN 978-3-8325-3407-3 40.50 EUR
- 148 Cathrin Blaes: Die übungsgestützte Lehrerrepräsentation im Chemieunterricht der Sekundarstufe I. *Evaluation der Effektivität*
ISBN 978-3-8325-3409-7 43.50 EUR
- 149 Julia Suckut: Die Wirksamkeit von piko-OWL als Lehrerfortbildung. Eine Evaluation zum Projekt *Physik im Kontext* in Fallstudien
ISBN 978-3-8325-3440-0 45.00 EUR
- 150 Alexandra Dorschu: Die Wirkung von Kontexten in Physikkompetenztestaufgaben
ISBN 978-3-8325-3446-2 37.00 EUR
- 151 Jochen Scheid: Multiple Repräsentationen, Verständnis physikalischer Experimente und kognitive Aktivierung: *Ein Beitrag zur Entwicklung der Aufgabenkultur*
ISBN 978-3-8325-3449-3 49.00 EUR
- 152 Tim Plasa: Die Wahrnehmung von Schülerlaboren und Schülerforschungszentren
ISBN 978-3-8325-3483-7 35.50 EUR
- 153 Felix Schoppmeier: Physikkompetenz in der gymnasialen Oberstufe. *Entwicklung und Validierung eines Kompetenzstrukturmodells für den Kompetenzbereich Umgang mit Fachwissen*
ISBN 978-3-8325-3502-5 36.00 EUR

- 154 Katharina Groß: Experimente alternativ dokumentieren. *Eine qualitative Studie zur Förderung der Diagnose- und Differenzierungskompetenz in der Chemielehrerbildung*
ISBN 978-3-8325-3508-7 43.50 EUR
- 155 Barbara Hank: Konzeptwandelprozesse im Anfangsunterricht Chemie. *Eine quasixperimentelle Längsschnittstudie*
ISBN 978-3-8325-3519-3 38.50 EUR
- 156 Katja Freyer: Zum Einfluss von Studieneingangsvoraussetzungen auf den Studienerfolg Erstsemesterstudierender im Fach Chemie
ISBN 978-3-8325-3544-5 38.00 EUR
- 157 Alexander Rachel: Auswirkungen instruktionaler Hilfen bei der Einführung des (Ferro-)Magnetismus. *Eine Vergleichsstudie in der Primar- und Sekundarstufe*
ISBN 978-3-8325-3548-3 43.50 EUR
- 158 Sebastian Ritter: Einfluss des Lerninhalts Nanogrößeneffekte auf Teilchen- und Teilchenmodellvorstellungen von Schülerinnen und Schülern
ISBN 978-3-8325-3558-2 36.00 EUR
- 159 Andrea Harbach: Problemorientierung und Vernetzung in kontextbasierten Lernaufgaben
ISBN 978-3-8325-3564-3 39.00 EUR
- 160 David Obst: Interaktive Tafeln im Physikunterricht. *Entwicklung und Evaluation einer Lehrerfortbildung*
ISBN 978-3-8325-3582-7 40.50 EUR
- 161 Sophie Kirschner: Modellierung und Analyse des Professionswissens von Physiklehrkräften
ISBN 978-3-8325-3601-5 35.00 EUR
- 162 Katja Stief: Selbstregulationsprozesse und Hausaufgabenmotivation im Chemieunterricht
ISBN 978-3-8325-3631-2 34.00 EUR
- 163 Nicola Meschede: Professionelle Wahrnehmung der inhaltlichen Strukturierung im naturwissenschaftlichen Grundschulunterricht. *Theoretische Beschreibung und empirische Erfassung*
ISBN 978-3-8325-3668-8 37.00 EUR
- 164 Johannes Maximilian Barth: Experimentieren im Physikunterricht der gymnasialen Oberstufe. *Eine Rekonstruktion übergeordneter Einbettungsstrategien*
ISBN 978-3-8325-3681-7 39.00 EUR
- 165 Sandra Lein: Das Betriebspraktikum in der Lehrerbildung. *Eine Untersuchung zur Förderung der Wissenschafts- und Technikbildung im allgemeinbildenden Unterricht*
ISBN 978-3-8325-3698-5 40.00 EUR
- 166 Veranika Maiseyenka: Modellbasiertes Experimentieren im Unterricht. *Praxistauglichkeit und Lernwirkungen*
ISBN 978-3-8325-3708-1 38.00 EUR

- 167 Christoph Stolzenberger: Der Einfluss der didaktischen Lernumgebung auf das Erreichen geforderter Bildungsziele am Beispiel der W- und P-Seminare im Fach Physik
ISBN 978-3-8325-3708-1 38.00 EUR
- 168 Pia Altenburger: Mehrebenenregressionsanalysen zum Physiklernen im Sachunterricht der Primarstufe. *Ergebnisse einer Evaluationsstudie.*
ISBN 978-3-8325-3717-3 37.50 EUR
- 169 Nora Ferber: Entwicklung und Validierung eines Testinstruments zur Erfassung von Kompetenzentwicklung im Fach Chemie in der Sekundarstufe I
ISBN 978-3-8325-3727-2 39.50 EUR
- 170 Anita Stender: Unterrichtsplanung: Vom Wissen zum Handeln.
Theoretische Entwicklung und empirische Überprüfung des Transformationsmodells der Unterrichtsplanung
ISBN 978-3-8325-3750-0 41.50 EUR
- 171 Jenna Koenen: Entwicklung und Evaluation von experimentunterstützten Lösungsbeispielen zur Förderung naturwissenschaftlich-experimenteller Arbeitsweisen
ISBN 978-3-8325-3785-2 43.00 EUR
- 172 Teresa Henning: Empirische Untersuchung kontextorientierter Lernumgebungen in der Hochschuldidaktik. *Entwicklung und Evaluation kontextorientierter Aufgaben in der Studieneingangsphase für Fach- und Nebenfachstudierende der Physik*
ISBN 978-3-8325-3801-9 43.00 EUR
- 173 Alexander Pusch: Fachspezifische Instrumente zur Diagnose und individuellen Förderung von Lehramtsstudierenden der Physik
ISBN 978-3-8325-3829-3 38.00 EUR
- 174 Christoph Vogelsang: Validierung eines Instruments zur Erfassung der professionellen Handlungskompetenz von (angehenden) Physiklehrkräften. *Zusammenhangsanalysen zwischen Lehrerkompetenz und Lehrerperformanz*
ISBN 978-3-8325-3846-0 50.50 EUR
- 175 Ingo Brebeck: Selbstreguliertes Lernen in der Studieneingangsphase im Fach Chemie
ISBN 978-3-8325-3859-0 37.00 EUR
- 176 Axel Eghtessad: Merkmale und Strukturen von Professionalisierungsprozessen in der ersten und zweiten Phase der Chemielehrerbildung. *Eine empirisch-qualitative Studie mit niedersächsischen Fachleiter_innen der Sekundarstufenlehrämter*
ISBN 978-3-8325-3861-3 45.00 EUR
- 177 Andreas Nehring: Wissenschaftliche Denk- und Arbeitsweisen im Fach Chemie. Eine kompetenzorientierte Modell- und Testentwicklung für den Bereich der Erkenntnisgewinnung
ISBN 978-3-8325-3872-9 39.50 EUR
- 178 Maike Schmidt: Professionswissen von Sachunterrichtslehrkräften. Zusammenhangsanalyse zur Wirkung von Ausbildungshintergrund und Unterrichtserfahrung auf das fachspezifische Professionswissen im Unterrichtsinhalt „Verbrennung“
ISBN 978-3-8325-3907-8 38.50 EUR

- 179 Jan Winkelmann: Auswirkungen auf den Fachwissenszuwachs und auf affektive Schülermerkmale durch Schüler- und Demonstrationsexperimente im Physikunterricht
ISBN 978-3-8325-3915-3 41.00 EUR
- 180 Iwen Kobow: Entwicklung und Validierung eines Testinstrumentes zur Erfassung der Kommunikationskompetenz im Fach Chemie
ISBN 978-3-8325-3927-6 34.50 EUR
- 181 Yvonne Gramzow: Fachdidaktisches Wissen von Lehramtsstudierenden im Fach Physik. Modellierung und Testkonstruktion
ISBN 978-3-8325-3931-3 42.50 EUR
- 182 Evelin Schröter: Entwicklung der Kompetenzerwartung durch Lösen physikalischer Aufgaben einer multimedialen Lernumgebung
ISBN 978-3-8325-3975-7 54.50 EUR
- 183 Inga Kallweit: Effektivität des Einsatzes von Selbsteinschätzungsbögen im Chemieunterricht der Sekundarstufe I. *Individuelle Förderung durch selbstreguliertes Lernen*
ISBN 978-3-8325-3965-8 44.00 EUR
- 184 Andrea Schumacher: Paving the way towards authentic chemistry teaching. *A contribution to teachers' professional development*
ISBN 978-3-8325-3976-4 48.50 EUR
- 185 David Woitkowski: Fachliches Wissen Physik in der Hochschulausbildung. *Konzeptualisierung, Messung, Niveaubildung*
ISBN 978-3-8325-3988-7 53.00 EUR
- 186 Marianne Korner: Cross-Age Peer Tutoring in Physik. *Evaluation einer Unterrichtsmethode*
ISBN 978-3-8325-3979-5 38.50 EUR
- 187 Simone Nakoinz: Untersuchung zur Verknüpfung submikroskopischer und makroskopischer Konzepte im Fach Chemie
ISBN 978-3-8325-4057-9 38.50 EUR
- 188 Sandra Anus: Evaluation individueller Förderung im Chemieunterricht. *Adaptivität von Lerninhalten an das Vorwissen von Lernenden am Beispiel des Basiskonzeptes Chemische Reaktion*
ISBN 978-3-8325-4059-3 43.50 EUR
- 189 Thomas Roßbegalle: Fachdidaktische Entwicklungsforschung zum besseren Verständnis atmosphärischer Phänomene. *Treibhauseffekt, saurer Regen und stratosphärischer Ozonabbau als Kontexte zur Vermittlung von Basiskonzepten der Chemie*
ISBN 978-3-8325-4059-3 45.50 EUR
- 190 Kathrin Steckenmesser-Sander: Gemeinsamkeiten und Unterschiede physikbezogener Handlungs-, Denk- und Lernprozesse von Mädchen und Jungen
ISBN 978-3-8325-4066-1 38.50 EUR
- 191 Cornelia Geller: Lernprozessorientierte Sequenzierung des Physikunterrichts im Zusammenhang mit Fachwissenserwerb. *Eine Videostudie in Finnland, Deutschland und der Schweiz*
ISBN 978-3-8325-4082-1 35.50 EUR

- 192 Jan Hofmann: Untersuchung des Kompetenzaufbaus von Physiklehrkräften während einer Fortbildungsmaßnahme
ISBN 978-3-8325-4104-0 38.50 EUR
- 193 Andreas Dickhäuser: Chemiespezifischer Humor. *Theoriebildung, Materialentwicklung, Evaluation*
ISBN 978-3-8325-4108-8 37.00 EUR
- 194 Stefan Korte: Die Grenzen der Naturwissenschaft als Thema des Physikunterrichts
ISBN 978-3-8325-4112-5 57.50 EUR
- 195 Carolin Hülsmann: Kurswahlmotive im Fach Chemie. Eine Studie zum Wahlverhalten und Erfolg von Schülerinnen und Schülern in der gymnasialen Oberstufe
ISBN 978-3-8325-4144-6 49.00 EUR
- 196 Caroline Körbs: Mindeststandards im Fach Chemie am Ende der Pflichtschulzeit
ISBN 978-3-8325-4148-4 34.00 EUR
- 197 Andreas Vorholzer: Wie lassen sich Kompetenzen des experimentellen Denkens und Arbeitens fördern? *Eine empirische Untersuchung der Wirkung eines expliziten und eines impliziten Instruktionsansatzes*
ISBN 978-3-8325-4194-1 37.50 EUR
- 198 Anna Katharina Schmitt: Entwicklung und Evaluation einer Chemielehrerfortbildung zum Kompetenzbereich Erkenntnisgewinnung
ISBN 978-3-8325-4228-3 39.50 EUR
- 199 Christian Maurer: Strukturierung von Lehr-Lern-Sequenzen
ISBN 978-3-8325-4247-4 36.50 EUR
- 200 Helmut Fischler, Elke Sumfleth (Hrsg.): Professionelle Kompetenz von Lehrkräften der Chemie und Physik
ISBN 978-3-8325-4523-9 34.00 EUR
- 201 Simon Zander: Lehrerfortbildung zu Basismodellen und Zusammenhänge zum Fachwissen
ISBN 978-3-8325-4248-1 35.00 EUR
- 202 Kerstin Arndt: Experimentierkompetenz erfassen. *Analyse von Prozessen und Mustern am Beispiel von Lehramtsstudierenden der Chemie*
ISBN 978-3-8325-4266-5 45.00 EUR
- 203 Christian Lang: Kompetenzorientierung im Rahmen experimentalchemischer Praktika
ISBN 978-3-8325-4268-9 42.50 EUR
- 204 Eva Cauet: Testen wir relevantes Wissen? *Zusammenhang zwischen dem Professionswissen von Physiklehrkräften und gutem und erfolgreichem Unterrichten*
ISBN 978-3-8325-4276-4 39.50 EUR
- 205 Patrick Löffler: Modellanwendung in Problemlöseaufgaben. *Wie wirkt Kontext?*
ISBN 978-3-8325-4303-7 35.00 EUR

- 206 Carina Gehlen: Kompetenzstruktur naturwissenschaftlicher Erkenntnisgewinnung im Fach Chemie
ISBN 978-3-8325-4318-1 43.00 EUR
- 207 Lars Oettinghaus: Lehrerüberzeugungen und physikbezogenes Professionswissen. *Vergleich von Absolventinnen und Absolventen verschiedener Ausbildungswege im Physikreferendariat*
ISBN 978-3-8325-4319-8 38.50 EUR
- 208 Jennifer Petersen: Zum Einfluss des Merkmals Humor auf die Gesundheitsförderung im Chemieunterricht der Sekundarstufe I. *Eine Interventionsstudie zum Thema Sonnenschutz*
ISBN 978-3-8325-4348-8 40.00 EUR
- 209 Philipp Straube: Modellierung und Erfassung von Kompetenzen naturwissenschaftlicher Erkenntnisgewinnung bei (Lehramts-) Studierenden im Fach Physik
ISBN 978-3-8325-4351-8 35.50 EUR
- 210 Martin Dickmann: Messung von Experimentierfähigkeiten. *Validierungsstudien zur Qualität eines computerbasierten Testverfahrens*
ISBN 978-3-8325-4356-3 41.00 EUR
- 211 Markus Bohlmann: Science Education. Empirie, Kulturen und Mechanismen der Didaktik der Naturwissenschaften
ISBN 978-3-8325-4377-8 44.00 EUR
- 212 Martin Draude: Die Kompetenz von Physiklehrkräften, Schwierigkeiten von Schülerinnen und Schülern beim eigenständigen Experimentieren zu diagnostizieren
ISBN 978-3-8325-4382-2 37.50 EUR
- 213 Henning Rode: Prototypen evidenzbasierten Physikunterrichts. *Zwei empirische Studien zum Einsatz von Feedback und Blackboxes in der Sekundarstufe*
ISBN 978-3-8325-4389-1 42.00 EUR
- 214 Jan-Henrik Kechel: Schülerschwierigkeiten beim eigenständigen Experimentieren. *Eine qualitative Studie am Beispiel einer Experimentieraufgabe zum Hooke'schen Gesetz*
ISBN 978-3-8325-4392-1 55.00 EUR
- 215 Katharina Fricke: Classroom Management and its Impact on Lesson Outcomes in Physics. *A multi-perspective comparison of teaching practices in primary and secondary schools*
ISBN 978-3-8325-4394-5 40.00 EUR
- 216 Hannes Sander: Orientierungen von Jugendlichen beim Urteilen und Entscheiden in Kontexten nachhaltiger Entwicklung. *Eine rekonstruktive Perspektive auf Bewertungskompetenz in der Didaktik der Naturwissenschaft*
ISBN 978-3-8325-4434-8 46.00 EUR
- 217 Inka Haak: Maßnahmen zur Unterstützung kognitiver und metakognitiver Prozesse in der Studieneingangsphase. *Eine Design-Based-Research-Studie zum universitären Lernzentrum Physiktreff*
ISBN 978-3-8325-4437-9 46.50 EUR

- 218 Martina Brandenburger: Was beeinflusst den Erfolg beim Problemlösen in der Physik?
Eine Untersuchung mit Studierenden
ISBN 978-3-8325-4409-6 42.50 EUR
- 219 Corinna Helms: Entwicklung und Evaluation eines Trainings zur Verbesserung der Erklärqualität von Schülerinnen und Schülern im Gruppenpuzzle
ISBN 978-3-8325-4454-6 42.50 EUR
- 220 Viktoria Rath: Diagnostische Kompetenz von angehenden Physiklehrkräften. *Modellierung, Testinstrumentenentwicklung und Erhebung der Performanz bei der Diagnose von Schülervorstellungen in der Mechanik*
ISBN 978-3-8325-4456-0 42.50 EUR
- 221 Janne Krüger: Schülerperspektiven auf die zeitliche Entwicklung der Naturwissenschaften
ISBN 978-3-8325-4457-7 45.50 EUR
- 222 Stefan Mutke: Das Professionswissen von Chemiereferendarinnen und -referendaren in Nordrhein-Westfalen. *Eine Längsschnittstudie*
ISBN 978-3-8325-4458-4 37.50 EUR
- 223 Sebastian Habig: Systematisch variierte Kontextaufgaben und ihr Einfluss auf kognitive und affektive Schülerfaktoren
ISBN 978-3-8325-4467-6 40.50 EUR
- 224 Sven Liepertz: Zusammenhang zwischen dem Professionswissen von Physiklehrkräften, dem sachstrukturellen Angebot des Unterrichts und der Schülerleistung
ISBN 978-3-8325-4480-5 34.00 EUR
- 225 Elina Platova: Optimierung eines Laborpraktikums durch kognitive Aktivierung
ISBN 978-3-8325-4481-2 39.00 EUR
- 226 Tim Reschke: Lese geschichten im Chemieunterricht der Sekundarstufe I zur Unterstützung von situationalem Interesse und Lernerfolg
ISBN 978-3-8325-4487-4 41.00 EUR
- 227 Lena Mareike Walper: Entwicklung der physikbezogenen Interessen und selbstbezogenen Kognitionen von Schülerinnen und Schülern in der Übergangsphase von der Primar- in die Sekundarstufe. *Eine Längsschnittanalyse vom vierten bis zum siebten Schuljahr*
ISBN 978-3-8325-4495-9 43.00 EUR
- 228 Stefan Anthofer: Förderung des fachspezifischen Professionswissens von Chemielehramtsstudierenden
ISBN 978-3-8325-4498-0 39.50 EUR
- 229 Marcel Bullinger: Handlungsorientiertes Physiklernen mit instruierten Selbsterklärungen in der Primarstufe. *Eine experimentelle Laborstudie*
ISBN 978-3-8325-4504-8 44.00 EUR
- 230 Thomas Amenda: Bedeutung fachlicher Elementarisierungen für das Verständnis der Kinematik
ISBN 978-3-8325-4531-4 43.50 EUR

- 231 Sabrina Milke: Beeinflusst *Priming* das Physiklernen?
Eine empirische Studie zum Dritten Newtonschen Axiom
ISBN 978-3-8325-4549-4 42.00 EUR
- 232 Corinna Erfmann: Ein anschaulicher Weg zum Verständnis der elektromagnetischen Induktion. *Evaluation eines Unterrichtsvorschlags und Validierung eines Leistungsdiagnoseinstruments*
ISBN 978-3-8325-4550-5 49.50 EUR
- 233 Hanne Rautenstrauch: Erhebung des (Fach-)Sprachstandes bei Lehramtsstudierenden im Kontext des Faches Chemie
ISBN 978-3-8325-4556-7 40.50 EUR
- 234 Tobias Klug: Wirkung kontextorientierter physikalischer Praktikumsversuche auf Lernprozesse von Studierenden der Medizin
ISBN 978-3-8325-4558-1 37.00 EUR
- 235 Mareike Bohrmann: Zur Förderung des Verständnisses der Variablenkontrolle im naturwissenschaftlichen Sachunterricht
ISBN 978-3-8325-4559-8 52.00 EUR
- 236 Anja Schödl: FALKO-Physik – Fachspezifische Lehrerkompetenzen im Fach Physik. *Entwicklung und Validierung eines Testinstruments zur Erfassung des fachspezifischen Professionswissens von Physiklehrkräften*
ISBN 978-3-8325-4553-6 40.50 EUR
- 237 Hilda Scheuermann: Entwicklung und Evaluation von Unterstützungsmaßnahmen zur Förderung der Variablenkontrollstrategie beim Planen von Experimenten
ISBN 978-3-8325-4568-0 39.00 EUR
- 238 Christian G. Strippel: Naturwissenschaftliche Erkenntnisgewinnung an chemischen Inhalten vermitteln. *Konzeption und empirische Untersuchung einer Ausstellung mit Experimentierstation*
ISBN 978-3-8325-4577-2 41.50 EUR
- 239 Sarah Rau: Durchführung von Sachunterricht im Vorbereitungsdienst. *Eine längsschnittliche, videobasierte Unterrichtsanalyse*
ISBN 978-3-8325-4579-6 46.00 EUR
- 240 Thomas Plotz: Lernprozesse zu nicht-sichtbarer Strahlung. *Empirische Untersuchungen in der Sekundarstufe 2*
ISBN 978-3-8325-4624-3 39.50 EUR
- 241 Wolfgang Aschauer: Elektrische und magnetische Felder. *Eine empirische Studie zu Lernprozessen in der Sekundarstufe II*
ISBN 978-3-8325-4625-0 50.00 EUR
- 242 Anna Donhauser: Didaktisch rekonstruierte Materialwissenschaft. *Aufbau und Konzeption eines Schülerlabors für den Exzellenzcluster Engineering of Advanced Materials*
ISBN 978-3-8325-4636-6 39.00 EUR

- 243 Katrin Schüßler: Lernen mit Lösungsbeispielen im Chemieunterricht. *Einflüsse auf Lernerfolg, kognitive Belastung und Motivation*
ISBN 978-3-8325-4640-3 42.50 EUR
- 244 Timo Fleischer: Untersuchung der chemischen Fachsprache unter besonderer Berücksichtigung chemischer Repräsentationen
ISBN 978-3-8325-4642-7 46.50 EUR
- 245 Rosina Steininger: Concept Cartoons als Stimuli für Kleingruppendiskussionen im Chemieunterricht. *Beschreibung und Analyse einer komplexen Lerngelegenheit*
ISBN 978-3-8325-4647-2 39.00 EUR
- 246 Daniel Rehfeldt: Erfassung der Lehrqualität naturwissenschaftlicher Experimentalpraktika
ISBN 978-3-8325-4590-1 40.00 EUR
- 247 Sandra Puddu: Implementing Inquiry-based Learning in a Diverse Classroom: Investigating Strategies of Scaffolding and Students' Views of Scientific Inquiry
ISBN 978-3-8325-4591-8 35.50 EUR
- 248 Markus Bliersbach: Kreativität in der Chemie. *Erhebung und Förderung der Vorstellungen von Chemielehramtsstudierenden*
ISBN 978-3-8325-4593-2 44.00 EUR
- 249 Lennart Kimpel: Aufgaben in der Allgemeinen Chemie. *Zum Zusammenspiel von chemischem Verständnis und Rechenfähigkeit*
ISBN 978-3-8325-4618-2 36.00 EUR
- 250 Louise Bindel: Effects of integrated learning: explicating a mathematical concept in inquiry-based science camps
ISBN 978-3-8325-4655-7 37.50 EUR
- 251 Michael Wenzel: Computereinsatz in Schule und Schülerlabor. *Einstellung von Physiklehrkräften zu Neuen Medien*
ISBN 978-3-8325-4659-5 38.50 EUR
- 252 Laura Muth: Einfluss der Auswertephase von Experimenten im Physikunterricht. *Ergebnisse einer Interventionsstudie zum Zuwachs von Fachwissen und experimenteller Kompetenz von Schülerinnen und Schülern*
ISBN 978-3-8325-4675-5 36.50 EUR
- 253 Annika Fricke: Interaktive Skripte im Physikalischen Praktikum. *Entwicklung und Evaluation von Hypermedien für die Nebenfachausbildung*
ISBN 978-3-8325-4676-2 41.00 EUR
- 254 Julia Haase: Selbstbestimmtes Lernen im naturwissenschaftlichen Sachunterricht. *Eine empirische Interventionsstudie mit Fokus auf Feedback und Kompetenzerleben*
ISBN 978-3-8325-4685-4 38.50 EUR
- 255 Antje J. Heine: Was ist Theoretische Physik? *Eine wissenschaftstheoretische Betrachtung und Rekonstruktion von Vorstellungen von Studierenden und Dozenten über das Wesen der Theoretischen Physik*
ISBN 978-3-8325-4691-5 46.50 EUR

- 256 Claudia Meinhardt: Entwicklung und Validierung eines Testinstruments zu Selbstwirksamkeitserwartungen von (angehenden) Physiklehrkräften in physikdidaktischen Handlungsfeldern
ISBN 978-3-8325-4712-7 47.00 EUR
- 257 Ann-Kathrin Schlüter: Professionalisierung angehender Chemielehrkräfte für einen Gemeinsamen Unterricht
ISBN 978-3-8325-4713-4 53.50 EUR
- 258 Stefan Richtberg: Elektronenbahnen in Feldern. Konzeption und Evaluation einer webbasierten Lernumgebung
ISBN 978-3-8325-4723-3 49.00 EUR
- 259 Jan-Philipp Burde: Konzeption und Evaluation eines Unterrichtskonzepts zu einfachen Stromkreisen auf Basis des Elektronengasmodells
ISBN 978-3-8325-4726-4 57.50 EUR
- 260 Frank Finkenberg: Flipped Classroom im Physikunterricht
ISBN 978-3-8325-4737-4 42.50 EUR
- 261 Florian Treisch: Die Entwicklung der Professionellen Unterrichtswahrnehmung im Lehr-Lern-Labor Seminar
ISBN 978-3-8325-4741-4 41.50 EUR
- 262 Desiree Mayr: Strukturiertheit des experimentellen naturwissenschaftlichen Problemlöseprozesses
ISBN 978-3-8325-4757-8 37.00 EUR
- 263 Katrin Weber: Entwicklung und Validierung einer Learning Progression für das Konzept der chemischen Reaktion in der Sekundarstufe I
ISBN 978-3-8325-4762-2 48.50 EUR
- 264 Hauke Bartels: Entwicklung und Bewertung eines performanznahen Videovignetten-tests zur Messung der Erklärfähigkeit von Physiklehrkräften
ISBN 978-3-8325-4804-9 37.00 EUR
- 265 Karl Marniok: Zum Wesen von Theorien und Gesetzen in der Chemie. *Begriffsanalyse und Förderung der Vorstellungen von Lehramtsstudierenden*
ISBN 978-3-8325-4805-6 42.00 EUR
- 266 Marisa Holzapfel: Fachspezifischer Humor als Methode in der Gesundheitsbildung im Übergang von der Primarstufe zur Sekundarstufe I
ISBN 978-3-8325-4808-7 50.00 EUR
- 267 Anna Stolz: Die Auswirkungen von Experimentiersituationen mit unterschiedlichem Öffnungsgrad auf Leistung und Motivation der Schülerinnen und Schüler
ISBN 978-3-8325-4781-3 38.00 EUR
- 268 Nina Ulrich: Interaktive Lernaufgaben in dem digitalen Schulbuch eChemBook. *Einfluss des Interaktivitätsgrads der Lernaufgaben und des Vorwissens der Lernenden auf den Lernerfolg*
ISBN 978-3-8325-4814-8 43.50 EUR

- 269 Kim-Alessandro Weber: Quantenoptik in der Lehrerfortbildung. *Ein bedarfsgeprägtes Fortbildungskonzept zum Quantenobjekt „Photon“ mit Realexperimenten*
ISBN 978-3-8325-4792-9 55.00 EUR
- 270 Nina Skorsetz: Empathisierer und Systematisierer im Vorschulalter. *Eine Fragebogen- und Videostudie zur Motivation, sich mit Naturphänomenen zu beschäftigen*
ISBN 978-3-8325-4825-4 43.50 EUR
- 271 Franziska Kehne: Analyse des Transfers von kontextualisiert erworbenem Wissen im Fach Chemie
ISBN 978-3-8325-4846-9 45.00 EUR
- 272 Markus Elsholz: Das akademische Selbstkonzept angehender Physiklehrkräfte als Teil ihrer professionellen Identität. *Dimensionalität und Veränderung während einer zentralen Praxisphase*
ISBN 978-3-8325-4857-5 37.50 EUR
- 273 Joachim Müller: Studienerfolg in der Physik. *Zusammenhang zwischen Modellierungskompetenz und Studienerfolg*
ISBN 978-3-8325-4859-9 35.00 EUR
- 274 Jennifer Dörscheln: Organische Leuchtdioden. *Implementation eines innovativen Themas in den Chemieunterricht*
ISBN 978-3-8325-4865-0 59.00 EUR
- 275 Stephanie Strelow: Beliefs von Studienanfängern des Kombi-Bachelors Physik über die Natur der Naturwissenschaften
ISBN 978-3-8325-4881-0 40.50 EUR
- 276 Dennis Jaeger: Kognitive Belastung und aufgabenspezifische sowie personenspezifische Einflussfaktoren beim Lösen von Physikaufgaben
ISBN 978-3-8325-4928-2 50.50 EUR
- 277 Vanessa Fischer: Der Einfluss von Interesse und Motivation auf die Messung von Fach- und Bewertungskompetenz im Fach Chemie
ISBN 978-3-8325-4933-6 39.00 EUR
- 278 René Dohrmann: Professionsbezogene Wirkungen einer Lehr-Lern-Labor-Veranstaltung. *Eine multimethodische Studie zu den professionsbezogenen Wirkungen einer Lehr-Lern-Labor-Blockveranstaltung auf Studierende der Bachelorstudiengänge Lehramt Physik und Grundschulpädagogik (Sachunterricht)*
ISBN 978-3-8325-4958-9 40.00 EUR
- 279 Meike Bergs: Can We Make Them Use These Strategies? *Fostering Inquiry-Based Science Learning Skills with Physical and Virtual Experimentation Environments*
ISBN 978-3-8325-4962-6 39.50 EUR
- 280 Marie-Therese Hauerstein: Untersuchung zur Effektivität von Strukturierung und Binnendifferenzierung im Chemieunterricht der Sekundarstufe I. *Evaluation der Strukturierungshilfe Lernleiter*
ISBN 978-3-8325-4982-4 42.50 EUR

- 281 Verena Zucker: Erkennen und Beschreiben von formativem Assessment im naturwissenschaftlichen Grundschulunterricht. *Entwicklung eines Instruments zur Erfassung von Teilfähigkeiten der professionellen Wahrnehmung von Lehramtsstudierenden*
ISBN 978-3-8325-4991-6 38.00 EUR
- 282 Victoria Telser: Erfassung und Förderung experimenteller Kompetenz von Lehrkräften im Fach Chemie
ISBN 978-3-8325-4996-1 50.50 EUR
- 283 Kristine Tschirschky: Entwicklung und Evaluation eines gedächtnisorientierten Aufgabendesigns für Physikaufgaben
ISBN 978-3-8325-5002-8 42.50 EUR
- 284 Thomas Elert: Course Success in the Undergraduate General Chemistry Lab
ISBN 978-3-8325-5004-2 41.50 EUR
- 285 Britta Kalthoff: Explizit oder implizit? *Untersuchung der Lernwirksamkeit verschiedener fachmethodischer Instruktionen im Hinblick auf fachmethodische und fachinhaltliche Fähigkeiten von Sachunterrichtsstudierenden*
ISBN 978-3-8325-5013-4 37.50 EUR
- 286 Thomas Dickmann: Visuelles Modellverständnis und Studienerfolg in der Chemie. *Zwei Seiten einer Medaille*
ISBN 978-3-8325-5016-5 44.00 EUR
- 287 Markus Sebastian Feser: Physiklehrkräfte korrigieren Schülertexte. *Eine Explorationsstudie zur fachlich-konzeptuellen und sprachlichen Leistungsfeststellung und -beurteilung im Physikunterricht*
ISBN 978-3-8325-5020-2 49.00 EUR
- 288 Matylda Dudzinska: Lernen mit Beispielaufgaben und Feedback im Physikunterricht der Sekundarstufe 1. *Energieerhaltung zur Lösung von Aufgaben nutzen*
ISBN 978-3-8325-5025-7 47.00 EUR
- 289 Ines Sonnenschein: Naturwissenschaftliche Denk- und Arbeitsprozesse Studierender im Labor
ISBN 978-3-8325-5033-2 52.00 EUR
- 290 Florian Simon: Der Einfluss von Betreuung und Betreuenden auf die Wirksamkeit von Schülerlaborbesuchen. *Eine Zusammenhangsanalyse von Betreuungsqualität, Betreuermerkmalen und Schülerlaborzielen sowie Replikationsstudie zur Wirksamkeit von Schülerlaborbesuchen*
ISBN 978-3-8325-5036-3 49.50 EUR
- 291 Marie-Annette Geyer: Physikalisch-mathematische Darstellungswechsel funktionaler Zusammenhänge. *Das Vorgehen von SchülerInnen der Sekundarstufe 1 und ihre Schwierigkeiten*
ISBN 978-3-8325-5047-9 46.50 EUR
- 292 Susanne Digel: Messung von Modellierungskompetenz in Physik. *Theoretische Herleitung und empirische Prüfung eines Kompetenzmodells physikspezifischer Modellierungskompetenz*
ISBN 978-3-8325-5055-4 41.00 EUR

- 293 Sönke Janssen: Angebots-Nutzungs-Prozesse eines Schülerlabors analysieren und gestalten. *Ein design-based research Projekt*
ISBN 978-3-8325-5065-3 57.50 EUR
- 294 Knut Wille: Der Productive Failure Ansatz als Beitrag zur Weiterentwicklung der Aufgabenkultur
ISBN 978-3-8325-5074-5 49.00 EUR
- 295 Lisanne Kraeva: Problemlösestrategien von Schülerinnen und Schülern diagnostizieren
ISBN 978-3-8325-5110-0 59.50 EUR
- 296 Jenny Lorentzen: Entwicklung und Evaluation eines Lernangebots im Lehramtsstudium Chemie zur Förderung von Vernetzungen innerhalb des fachbezogenen Professionswissens
ISBN 978-3-8325-5120-9 39.50 EUR
- 297 Micha Winkelmann: Lernprozesse in einem Schülerlabor unter Berücksichtigung individueller naturwissenschaftlicher Interessenstrukturen
ISBN 978-3-8325-5147-6 48.50 EUR
- 298 Carina Wöhlke: Entwicklung und Validierung eines Instruments zur Erfassung der professionellen Unterrichtswahrnehmung angehender Physiklehrkräfte
ISBN 978-3-8325-5149-0 43.00 EUR
- 299 Thomas Schubatzky: Das Amalgam Anfangs-Elektrizitätslehreunterricht. *Eine multiperspektivische Betrachtung in Deutschland und Österreich*
ISBN 978-3-8325-5159-9 50.50 EUR
- 300 Amany Annaggar: A Design Framework for Video Game-Based Gamification Elements to Assess Problem-solving Competence in Chemistry Education
ISBN 978-3-8325-5150-6 52.00 EUR
- 301 Alexander Engl: CHEMIE PUR – Unterrichten in der Natur: *Entwicklung und Evaluation eines kontextorientierten Unterrichtskonzepts im Bereich Outdoor Education zur Änderung der Einstellung zu „Chemie und Natur“*
ISBN 978-3-8325-5174-2 59.00 EUR
- 302 Christin Marie Sajons: Kognitive und motivationale Dynamik in Schülerlaboren. *Kontextualisierung, Problemorientierung und Autonomieunterstützung der didaktischen Struktur analysieren und weiterentwickeln*
ISBN 978-3-8325-5155-1 56.00 EUR
- 303 Philipp Bitzenbauer: Quantenoptik an Schulen. *Studie im Mixed-Methods Design zur Evaluation des Erlanger Unterrichtskonzepts zur Quantenoptik*
ISBN 978-3-8325-5123-0 59.00 EUR
- 304 Malte S. Ubben: Typisierung des Verständnisses mentaler Modelle mittels empirischer Datenerhebung am Beispiel der Quantenphysik
ISBN 978-3-8325-5181-0 43.50 EUR
- 305 Wiebke Kuske-Janßen: Sprachlicher Umgang mit Formeln von LehrerInnen im Physikunterricht am Beispiel des elektrischen Widerstandes in Klassenstufe 8
ISBN 978-3-8325-5183-4 47.50 EUR

- 306 Kai Bliesmer: Physik der Küste für außerschulische Lernorte. *Eine Didaktische Rekonstruktion*
ISBN 978-3-8325-5190-2 58.00 EUR
- 307 Nikola Schild: Eignung von domänenspezifischen Studieneingangsvariablen als Prädiktoren für Studienerfolg im Fach und Lehramt Physik
ISBN 978-3-8325-5226-8 42.00 EUR
- 308 Daniel Averbeck: Zum Studienerfolg in der Studieneingangsphase des Chemiestudiums. *Der Einfluss kognitiver und affektiv-motivationaler Variablen*
ISBN 978-3-8325-5227-5 51.00 EUR
- 309 Martina Strübe: Modelle und Experimente im Chemieunterricht. *Eine Videostudie zum fachspezifischen Lehrerwissen und -handeln*
ISBN 978-3-8325-5245-9 45.50 EUR
- 310 Wolfgang Becker: Auswirkungen unterschiedlicher experimenteller Repräsentationen auf den Kenntnisstand bei Grundschulkindern
ISBN 978-3-8325-5255-8 50.00 EUR
- 311 Marvin Rost: Modelle als Mittel der Erkenntnisgewinnung im Chemieunterricht der Sekundarstufe I. *Entwicklung und quantitative Dimensionalitätsanalyse eines Testinstruments aus epistemologischer Perspektive*
ISBN 978-3-8325-5256-5 44.00 EUR
- 312 Christina Kobl: Förderung und Erfassung der Reflexionskompetenz im Fach Chemie
ISBN 978-3-8325-5259-6 41.00 EUR
- 313 Ann-Kathrin Beretz: Diagnostische Prozesse von Studierenden des Lehramts – *eine Videostudie in den Fächern Physik und Mathematik*
ISBN 978-3-8325-5288-6 45.00 EUR
- 314 Judith Breuer: Implementierung fachdidaktischer Innovationen durch das Angebot materialgestützter Unterrichtskonzeptionen. *Fallanalysen zum Nutzungsverhalten von Lehrkräften am Beispiel des Münchener Lehrgangs zur Quantenmechanik*
ISBN 978-3-8325-5293-0 50.50 EUR
- 315 Michaela Oettle: Modellierung des Fachwissens von Lehrkräften in der Teilchenphysik. *Eine Delphi-Studie*
ISBN 978-3-8325-5305-0 57.50 EUR
- 316 Volker Brüggemann: Entwicklung und Pilotierung eines adaptiven Multistage-Tests zur Kompetenzerfassung im Bereich naturwissenschaftlichen Denkens
ISBN 978-3-8325-5331-9 40.00 EUR
- 317 Stefan Müller: Die Vorläufigkeit und soziokulturelle Eingebundenheit naturwissenschaftlicher Erkenntnisse. *Kritische Reflexion, empirische Befunde und fachdidaktische Konsequenzen für die Chemielehrer*innenbildung*
ISBN 978-3-8325-5343-2 63.00 EUR
- 318 Laurence Müller: Alltagsentscheidungen für den Chemieunterricht erkennen und Entscheidungsprozesse explorativ begleiten
ISBN 978-3-8325-5379-1 59.00 EUR

- 319 Lars Ehlert: Entwicklung und Evaluation einer Lehrkräftefortbildung zur Planung von selbstgesteuerten Experimenten
ISBN 978-3-8325-5393-71 41.50 EUR
- 320 Florian Seiler: Entwicklung und Evaluation eines Seminarkonzepts zur Förderung der experimentellen Planungskompetenz von Lehramtsstudierenden im Fach Chemie
ISBN 978-3-8325-5397-5 47.50 EUR
- 321 Nadine Boele: Entwicklung eines Messinstruments zur Erfassung der professionellen Unterrichtswahrnehmung von (angehenden) Chemielehrkräften hinsichtlich der Lernunterstützung
ISBN 978-3-8325-5402-6 46.50 EUR
- 322 Franziska Zimmermann: Entwicklung und Evaluation digitalisierungsbezogener Kompetenzen von angehenden Chemielehrkräften
ISBN 978-3-8325-5410-1 49.50 EUR
- 323 Lars-Frederik Weiß: Der Flipped Classroom in der Physik-Lehre. *Empirische Untersuchungen in Schule und Hochschule*
ISBN 978-3-8325-5418-7 51.00 EUR
- 324 Tilmann Steinmetz: Kumulatives Lehren und Lernen im Lehramtsstudium Physik. *Theorie und Evaluation eines Lehrkonzepts*
ISBN 978-3-8325-5421-7 51.00 EUR
- 325 Kübra Nur Celik: Entwicklung von chemischem Fachwissen in der Sekundarstufe I. *Validierung einer Learning Progression für die Basiskonzepte „Struktur der Materie“, „Chemische Reaktion“ und „Energie“ im Kompetenzbereich „Umgang mit Fachwissen“*
ISBN 978-3-8325-5431-6 55.00 EUR
- 326 Matthias Ungermann: Förderung des Verständnisses von Nature of Science und der experimentellen Kompetenz im Schüler*innen-Labor Physik in Abgrenzung zum Regelunterricht
ISBN 978-3-8325-5442-2 55.50 EUR
- 327 Christoph Hoyer: Multimedial unterstütztes Experimentieren im webbasierten Labor zur Messung, Visualisierung und Analyse des Feldes eines Permanentmagneten
ISBN 978-3-8325-5453-8 45.00 EUR
- 328 Tobias Schüttler: Schülerlabore als interesselördernde authentische Lernorte für den naturwissenschaftlichen Unterricht nutzen
ISBN 978-3-8325-5454-5 50.50 EUR
- 329 Christopher Kurth: Die Kompetenz von Studierenden, Schülerschwierigkeiten beim eigenständigen Experimentieren zu diagnostizieren
ISBN 978-3-8325-5457-6 58.50 EUR
- 330 Dagmar Michna: Inklusiver Anfangsunterricht Chemie *Entwicklung und Evaluation einer Unterrichtseinheit zur Einführung der chemischen Reaktion*
ISBN 978-3-8325-5463-7 49.50 EUR
- 331 Marco Seiter: Die Bedeutung der Elementarisierung für den Erfolg von Mechanikunterricht in der Sekundarstufe I
ISBN 978-3-8325-5471-2 66.00 EUR

- 332 Jörn Hägele: Kompetenzaufbau zum experimentbezogenen Denken und Arbeiten. *Videobasierte Analysen zu Aktivitäten und Vorstellungen von Schülerinnen und Schülern der gymnasialen Oberstufe bei der Bearbeitung von fachmethodischer Instruktion*
ISBN 978-3-8325-5476-7 56.50 EUR
- 333 Erik Heine: Wissenschaftliche Kontroversen im Physikunterricht. *Explorationsstudie zum Umgang von Physiklehrkräften und Physiklehrerstudierenden mit einer wissenschaftlichen Kontroverse am Beispiel der Masse in der Speziellen Relativitätstheorie*
ISBN 978-3-8325-5478-1 48.50 EUR
- 334 Simon Goertz: Module und Lernzirkel der Plattform FLexKom zur Förderung experimenteller Kompetenzen in der Schulpraxis *Verlauf und Ergebnisse einer Design-Based Research Studie*
ISBN 978-3-8325-5494-1 66.50 EUR
- 335 Christina Toschka: Lernen mit Modellexperimenten *Empirische Untersuchung der Wahrnehmung und des Denkens in Analogien beim Umgang mit Modellexperimenten*
ISBN 978-3-8325-5495-8 50.00 EUR
- 336 Alina Behrendt: Chemiebezogene Kompetenzen in der Übergangsphase zwischen dem Sachunterricht der Primarstufe und dem Chemieunterricht der Sekundarstufe I
ISBN 978-3-8325-5498-9 40.50 EUR
- 337 Manuel Daiber: Entwicklung eines Lehrkonzepts für eine elementare Quantenmechanik *Formuliert mit In-Out Symbolen*
ISBN 978-3-8325-5507-8 48.50 EUR
- 338 Felix Pawlak: Das Gemeinsame Experimentieren (an-)leiten *Eine qualitative Studie zum chemiespezifischen Classroom-Management*
ISBN 978-3-8325-5508-5 46.50 EUR
- 339 Liza Dopatka: Konzeption und Evaluation eines kontextstrukturierten Unterrichtskonzeptes für den Anfangs-Elektrizitätslehreunterricht
ISBN 978-3-8325-5514-6 69.50 EUR
- 340 Arne Bewersdorff: Untersuchung der Effektivität zweier Fortbildungsformate zum Experimentieren mit dem Fokus auf das Unterrichtshandeln
ISBN 978-3-8325-5522-1 39.00 EUR
- 341 Thomas Christoph Münster: Wie diagnostizieren Studierende des Lehramtes physikbezogene Lernprozesse von Schüler*innen? Eine Videostudie zur Mechanik
ISBN 978-3-8325-5534-4 44.50 EUR
- 342 Ines Komor: Förderung des symbolisch-mathematischen Modellverständnisses in der Physikalischen Chemie
ISBN 978-3-8325-5546-7 46.50 EUR
- 343 Verena Petermann: Überzeugungen von Lehrkräften zum Lehren und Lernen von Fachinhalten und Fachmethoden und deren Beziehung zu unterrichtsnahem Handeln
ISBN 978-3-8325-5545-0 47.00 EUR

- 344 Jana Heinze: Einfluss der sprachlichen Konzeption auf die Einschätzung der Qualität instruktionaler Unterrichtserklärungen im Fach Physik
ISBN 978-3-8325-5545-0 47.00 EUR
- 345 Jannis Weber: Mathematische Modellbildung und Videoanalyse zum Lernen der Newtonschen Dynamik im Vergleich
ISBN 978-3-8325-5566-5 68.00 EUR
- 346 Fabian Sterzing: Zur Lernwirksamkeit von Erklärvideos in der Physik *Eine Untersuchung in Abhängigkeit von ihrer fachdidaktischen Qualität und ihrem Einbettungsformat*
ISBN 978-3-8325-5576-4 52.00 EUR
- 347 Lars Greitemann: Wirkung des Tablet-Einsatzes im Chemieunterricht der Sekundarstufe I unter besonderer Berücksichtigung von Wissensvermittlung und Wissenssicherung
ISBN 978-3-8325-5580-1 50.00 EUR
- 348 Fabian Poensgen: Diagnose experimenteller Kompetenzen in der laborpraktischen Chemielehrer*innenbildung
ISBN 978-3-8325-5587-0 48.00 EUR
- 349 William Lindlahr: Virtual-Reality-Experimente *Entwicklung und Evaluation eines Konzepts für den forschend-entwickelnden Physikunterricht mit digitalen Medien*
ISBN 978-3-8325-5595-5 49.00 EUR
- 350 Bert Schlüter: Teilnahmemotivation und situationales Interesse von Kindern und Eltern im experimentellen Lernsetting KEMIE
ISBN 978-3-8325-5598-6 43.00 EUR
- 351 Katharina Nave: Charakterisierung situativer mentaler Modellkomponenten in der Chemie und die Bildung von Hypothesen *Eine qualitative Studie zur Operationalisierung mentaler Modellkomponenten für den Fachbereich Chemie*
ISBN 978-3-8325-5599-3 43.00 EUR
- 352 Anna B. Bauer: Experimentelle Kompetenz Physikstudierender *Entwicklung und erste Erprobung eines performanzorientierten Kompetenzstrukturmodells unter Nutzung qualitativer Methoden*
ISBN 978-3-8325-5625-9 47.00 EUR
- 353 Jan Schröder: Entwicklung eines Performanztests zur Messung der Fähigkeit zur Unterrichtsplanung bei Lehramtsstudierenden im Fach Physik
ISBN 978-3-8325-5655-9 46.50 EUR
- 354 Susanne Gerlach: Aspekte einer Fachdidaktik Körperpflege *Ein Beitrag zur Standardentwicklung*
ISBN 978-3-8325-5659-4 45.00 EUR
- 355 Livia Murer: Diagnose experimenteller Kompetenzen beim praktisch-naturwissenschaftlichen Arbeiten *Vergleich verschiedener Methoden und kognitive Validierung eines Testverfahrens*
ISBN 978-3-8325-5657-0 41.50 EUR

- 356 Andrea Maria Schmid: Authentische Kontexte für MINT-Lernumgebungen *Eine zweiteilige Interventionsstudie in den Fachdidaktiken Physik und Technik*
ISBN 978-3-8325-5605-1 57.00 EUR
- 357 Julia Ortmann: Bedeutung und Förderung von Kompetenzen zum naturwissenschaftlichen Denken und Arbeiten in universitären Praktika
ISBN 978-3-8325-5670-9 37.00 EUR
- 358 Axel-Thilo Prokop: Entwicklung eines Lehr-Lern-Labors zum Thema Radioaktivität *Eine didaktische Rekonstruktion*
ISBN 978-3-8325-5671-6 49.50 EUR
- 359 Timo Hackemann: Textverständlichkeit sprachlich variiertes physikbezogener Sachtexte
ISBN 978-3-8325-5675-4 41.50 EUR
- 360 Dennis Dietz: Vernetztes Lernen im fächerdifferenzierten und integrierten naturwissenschaftlichen Unterricht aufgezeigt am Basiskonzept Energie *Eine Studie zur Analyse der Wirksamkeit der Konzeption und Implementation eines schulinternen Curriculums für das Unterrichtsfach „Integrierte Naturwissenschaften 7/8“*
ISBN 978-3-8325-5676-1 49.50 EUR
- 361 Ann-Katrin Krebs: Vielfalt im Physikunterricht *Zur Wirkung von Lehrkräftefortbildungen unter Diversitätsaspekten*
ISBN 978-3-8325-5672-3 65.50 EUR
- 362 Simon Kaulhausen: Strukturelle Ursachen für Klausurmisserfolg in Allgemeiner Chemie an der Universität
ISBN 978-3-8325-5699-0 37.50 EUR
- 363 Julia Eckoldt: Den (Sach-)Unterricht öffnen *Selbstkompetenzen und motivationale Orientierungen von Lehrkräften bei der Implementation einer Innovation untersucht am Beispiel des Freien Explorierens und Experimentierens*
ISBN 978-3-8325-5663-1 48.50 EUR
- 364 Albert Teichrew: Physikalische Modellbildung mit dynamischen Modellen
ISBN 978-3-8325-5710-2 58.50 EUR
- 365 Sascha Neff: Transfer digitaler Innovationen in die Schulpraxis *Eine explorative Untersuchung zur Förderung der Implementation*
ISBN 978-3-8325-5687-7 59.00 EUR

Alle erschienenen Bücher können unter der angegebenen ISBN direkt online (<http://www.logos-verlag.de>) oder per Fax (030 - 42 85 10 92) beim Logos Verlag Berlin bestellt werden.

Studien zum Physik- und Chemielernen

Herausgegeben von Martin Hopf und Mathias Ropohl

Die Reihe umfasst inzwischen eine große Zahl von wissenschaftlichen Arbeiten aus vielen Arbeitsgruppen der Physik- und Chemiedidaktik und zeichnet damit ein gültiges Bild der empirischen physik- und chemiedidaktischen Forschung im deutschsprachigen Raum.

Die Herausgeber laden daher Interessenten zu neuen Beiträgen ein und bitten sie, sich im Bedarfsfall an den Logos-Verlag oder an ein Mitglied des Herausgeberteams zu wenden.

Kontaktadressen:

Univ.-Prof. Dr. Martin Hopf
Universität Wien,
Österreichisches Kompetenzzentrum
für Didaktik der Physik,
Porzellangasse 4, Stiege 2,
1090 Wien, Österreich,
Tel. +43-1-4277-60330,
e-mail: martin.hopf@univie.ac.at

Prof. Dr. Mathias Ropohl
Didaktik der Chemie,
Fakultät für Chemie,
Universität Duisburg-Essen,
Schützenbahn 70, 45127 Essen,
Tel. 0201-183 2704,
e-mail: mathias.ropohl@uni-due.de

Im naturwissenschaftlichen Unterricht setzt hypothesengeleitetes Experimentieren bei den Lernenden eine Grundvorstellung über die untersuchten Zusammenhänge voraus. Die Arbeit mit einem dynamischen Modell soll im didaktischen Konzept der physikalischen Modellbildung die Lücke zwischen einer naturwissenschaftlichen Fragestellung und einer im Experiment überprüfaren Hypothese schließen.

Die Anwendung des aus erkenntnistheoretischen Überlegungen abgeleiteten Konzepts wird in einer explorativen Studie im Mixed-Methods-Design analysiert, in der sich $N = 41$ Lehramtsstudierende mit GeoGebra-Modellen auf ein Experiment im Praktikum der Optik vorbereiten. Anhand von Videoaufnahmen werden Faktoren und Verhaltensmuster der Arbeit mit einem dynamischen Modell identifiziert. Diese Merkmale werden in Abhängigkeit individueller Lernvoraussetzungen auf Zusammenhänge mit der Qualität und Quantität der formulierten Hypothesen sowie den Handlungen im Experiment untersucht.

Aus den Daten wird ersichtlich, dass die Formulierung komplexer Hypothesen und ihre Überprüfung in einem Experiment erst bei gründlicher Arbeit mit dem dynamischen Modell erfolgt. Als Ergebnis werden Gestaltungsempfehlungen für dynamische Modelle abgeleitet, die eine zielgerichtete Untersuchung des modellierten Systems ermöglichen. Sie werden in einem Unterrichtskonzept für die Optik umgesetzt, das sich durch die Modellierung optischer Phänomene und die Überprüfung der Modellaussagen in Experimenten auszeichnet.

Logos Verlag Berlin

ISBN 978-3-8325-5710-2