

Glatz, Lion Cornelius

Eine vergleichende Betrachtung der Überzeugungskraft von Experimenten zum Teilchenmodell

Berlin : Logos Verlag Berlin 2025, 162 S. - (Studien zum Physik- und Chemielernen; 389) - (Dissertation, Johann Wolfgang Goethe-Universität, 2024)



Quellenangabe/ Reference:

Glatz, Lion Cornelius: Eine vergleichende Betrachtung der Überzeugungskraft von Experimenten zum Teilchenmodell. Berlin : Logos Verlag Berlin 2025, 162 S. - (Studien zum Physik- und Chemielernen; 389) - (Dissertation, Johann Wolfgang Goethe-Universität, 2024) - URN: urn:nbn:de:0111-pedocs-339978 - DOI: 10.25656/01:33997; 10.30819/5954

<https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0111-pedocs-339978>

<https://doi.org/10.25656/01:33997>

in Kooperation mit / in cooperation with:



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

Nutzungsbedingungen

Dieses Dokument steht unter folgender Creative Commons-Lizenz: <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.de> - Sie dürfen das Werk bzw. den Inhalt vervielfältigen, verbreiten und öffentlich zugänglich machen sowie Abwandlungen und Bearbeitungen des Werkes bzw. Inhaltes anfertigen, solange sie den Namen des Autors/Rechteinhabers in der von ihm festgelegten Weise nennen und die daraufhin neu entstandenen Werke bzw. Inhalte nur unter Verwendung von Lizenzbedingungen weitergeben, die mit denen dieses Lizenzvertrags identisch, vergleichbar oder kompatibel sind. Mit der Verwendung dieses Dokuments erkennen Sie die Nutzungsbedingungen an.

Terms of use

This document is published under following Creative Commons-License: <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.en> - You may copy, distribute and transmit, adapt or exhibit the work or its contents in public and alter, transform, or change this work as long as you attribute the work in the manner specified by the author or licensor. New resulting works or contents must be distributed pursuant to this license or an identical or comparable license.

By using this particular document, you accept the above-stated conditions of use.



Kontakt / Contact:

peDOCS
DIPF | Leibniz-Institut für Bildungsforschung und Bildungsinformation
Informationszentrum (IZ) Bildung
E-Mail: pedocs@dipf.de
Internet: www.pedocs.de

Mitglied der


Leibniz-Gemeinschaft

Lion Cornelius Glatz

**Eine vergleichende Betrachtung der
Überzeugungskraft von Experimenten
zum Teilchenmodell**

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 389

Lion Cornelius Glatz

**Eine vergleichende Betrachtung der
Überzeugungskraft von Experimenten
zum Teilchenmodell**

Logos Verlag Berlin

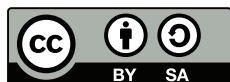


Studien zum Physik- und Chemielernen

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 der Creative Commons Lizenz CC BY-SA 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>). Die Bedingungen der Creative-Commons-Lizenz gelten nur für Originalmaterial. Die Wiederverwendung von Material aus anderen Quellen (gekennzeichnet mit Quellenangabe) wie z. B. Schaubilder, Abbildungen, Fotos und Textauszüge erfordert ggf. weitere Nutzungsgenehmigungen durch den jeweiligen Rechteinhaber.

Die Open-Access-Publikation dieses Buches wurde durch den Open-Access-Publikationsfonds der Goethe-Universität Frankfurt unterstützt.

Logos Verlag Berlin GmbH 2025

ISBN 978-3-8325-5954-0

ISSN 1614-8967

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>

Eine vergleichende Betrachtung der Überzeugungskraft von Experimenten zum Teilchenmodell

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Naturwissenschaften

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

von
Lion Cornelius Glatz
aus Starnberg, Deutschland

Frankfurt am Main 2024
(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. Burkhard Priemer

Datum der Disputation: 13.12.2024

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird die Überzeugungskraft von Experimenten zum Teilchenmodell untersucht, die für die Einführung dieses Themas im Schulunterricht der Sekundarstufe I geeignet sind. Die Frage nach der Überzeugungskraft ist in diesem Fall besonders relevant, da für ein fachlich angemessenes Verständnis zum Teilchenmodell, Schüler*innen Vorstellungen über den Aufbau der Materie akzeptieren und annehmen müssen, die selbst anschauliche Experimente nur indirekt zeigen können.

Im Fokus dieser Arbeit stehen acht Experimente, die unterschiedliche Aspekte eines einheitlichen Teilchenmodells vermitteln. Dabei soll dieses Teilchenmodell möglichst gut die in den Experimenten behandelten Phänomene erklären können und gleichzeitig keine Beschreibungen enthalten, die für ein komplexeres Verständnis über den Aufbau der Materie zu einem späteren Zeitpunkt hinderlich sein könnten.

Damit sich die Experimente gut vergleichen lassen, werden sie in der Form von interaktiven Videos eingesetzt. Im Rahmen der Haupterhebung erhalten Schüler*innen der achten Jahrgangsstufe ($N = 153$) vor und nach der Durchführung jedes Experiments die Möglichkeit, zwischen drei unterschiedlichen Aussagen über den Aufbau der Materie zu entscheiden. Dabei ist jeweils eine der drei Aussagen die fachlich adäquate und wird auch durch die Auswertung des jeweiligen Experiments unterstützt. Um Aussagen über die unterschiedliche Überzeugungskraft der Experimente treffen zu können, werden die Häufigkeiten verglichen, mit denen zur richtigen Modellaussage nach der Durchführung des Experiments gewechselt wird.

Außerdem werden weitere Variablen erhoben, wie die Einschätzung zweier unterschiedlicher Argumentkategorien, die für den Wechsel oder das Beibehalten einer Modellaussagenauswahl verantwortlich sind sowie die wahrgenommene inhaltliche Schwierigkeit der Experimente und die Komplexität des jeweiligen Versuchsaufbaus.

Die Ergebnisse zeigen über die Intervention mit allen acht Experimenten hinweg keinen statistisch signifikanten Zuwachs im Konzeptverständnis zum Aufbau der Materie der Schüler*innen. Wie überzeugend die Experimente wahrgenommen werden, unterscheidet sich allerdings zum Teil deutlich. Mögliche Ursachen für

die Unterschiedlichkeit werden in dieser Arbeit unter Berücksichtigung der Ergebnisse weiterer Variablen ausführlich diskutiert. Dabei fällt auf, dass vor allem die Experimente überzeugend wirken, die inhaltlich weniger schwierig sind und in denen anschauliche Phänomene gezeigt werden, beispielsweise die Bewegung von Partikeln in einer Rauchkammer oder der Diffusionsprozess von gefärbtem Wasser. Außerdem legen die Ergebnisse nahe, dass die wahrgenommene inhaltliche Schwierigkeit der Experimente von der visuellen Komplexität des Aufbaus abhängt.

Abkürzungsverzeichnis

ANOVA	Analysis of Variance
rmANOVA	repeated measures Analysis of Variance
CLT	Cognitive Load Theory
CTML	Cognitive Theory of Multimedia Learning
ELM	Elaboration Likelihood Model
ECL	Extraneous Cognitive Load
GCL	Germane Cognitive Load
IBE	Interaktives Bildschirmexperiment
ICL	Intrinsic Cognitive Load
ICLS	Intrinsic Cognitive Load Scale
KMK	Kultusministerkonferenz
LP	Learning Progression
MC	Multiple Choice
OMC	Ordered Multiple Choice

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	III
Abkürzungsverzeichnis.....	V
Inhaltsverzeichnis	VII
1 Einleitung	1
Theoretischer Teil	3
2 Lerntheoretische Grundlagen.....	5
2.1 Conceptual Change.....	7
2.1.1 Der theoriebasierte Ansatz	9
2.1.2 Der fragmentbasierte Ansatz	13
2.1.3 Learning Progressions und das Teilchenmodell der Materie.....	14
2.2 Lernen mit digitalen Inhalten.....	17
2.2.1 Cognitive Theory of Multimedia Learning	17
2.2.2 Cognitive Load Theory	21
2.3 Überzeugungskraft	23
2.3.1 Definition und begriffliche Trennung.....	24
2.3.2 Das Elaboration Likelihood Model of Persuasion	25
3 Das Teilchenmodell der Materie.....	31
3.1 Fachliche Betrachtung.....	31
3.2 Das Teilchenmodell im naturwissenschaftlichen Unterricht	34
3.2.1 Schülervorstellungen zum Aufbau der Materie	41
4 Experimente im Physikunterricht	43
4.1 Rolle und Funktion des Experimentierens im Physikunterricht	44
4.2 Digitalisierte Experimente	47
4.3 Experimente zum Teilchenmodell	49
4.3.1 Experimente zur Vorstellung „Teilchen sind in ständiger Bewegung“	50
4.3.2 Experimente zur Vorstellung „Zwischen Teilchen ist leerer Raum“	51
4.3.3 Experimente zum Kristallisationsprozess.....	52
4.3.4 Experimente zum Thematisieren von mikroskopischen und makroskopischen Eigenschaften	53
4.3.5 Experimente zum „Sichtbarmachen“ von Teilchen	53

Empirischer Teil	55
5 Studiendesign	57
5.1 Forschungsfragen.....	57
5.2 Verwendetes Teilchenmodell	58
5.3 Auswahl der Experimente	59
5.4 Gestaltung der Experimente als interaktive Videos	63
6 Methoden.....	69
6.1 Konzepttest zum Aufbau der Materie.....	70
6.2 Erhebung der Überzeugungskraft	72
6.2.1 Modellaussagenauswahl.....	72
6.2.2 Argumente zur Begründung der Modellaussagenauswahl.....	75
6.3 Erhebung von Merkmalen der Experimente	76
6.3.1 Inhaltliche Schwierigkeit	76
6.3.2 Komplexität des Aufbaus	79
6.3.3 Wahrgenommene System Usability	80
6.4 Forschungshypothesen.....	82
6.5 Pilotierung.....	84
6.5.1 Methoden und Stichprobe	84
6.5.2 Ergebnisse der quantitativen Anteile	85
6.5.3 Ergebnisse der qualitativen Anteile	87
6.5.4 Interpretation der Ergebnisse der quantitativen Anteile	88
6.5.5 Anpassungen der Hauptstudie	89
6.6 Stichprobe und praktische Umsetzung der Hauptstudie.....	90
7 Ergebnisse	91
7.1 Konzepttest	93
7.1.1 Voraussetzungen	93
7.1.2 Ergebnisse des gepaarten t-Tests	93
7.1.3 Ergebnisse des Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests.....	94
7.2 Modellaussagenauswahl.....	94
7.3 Sicherheit der Modellaussagenauswahl	96
7.4 Begründung der Sicherheit	98
7.5 Begründung der Modellaussagenauswahl	100
7.5.1 Beobachtungen	101
7.5.2 Intuition	101

7.6	Merkmale der Experimente	102
7.6.1	Intrinsic Cognitive Load.....	102
7.6.2	System Usability	104
7.6.3	Versuchsaufbau.....	104
8	Diskussion	107
8.1	Interpretation der Ergebnisse	107
8.1.1	Interpretation der Ergebnisse des Konzepttests	107
8.1.2	Vergleichende Betrachtung der Überzeugungskraft der Experimente	107
8.1.3	Merkmale der Experimente	114
8.2	Hypothesenentscheidungen	116
8.3	Limitationen.....	117
8.4	Implikationen für zukünftige Forschung.....	120
8.5	Bedeutung für den naturwissenschaftlichen Unterricht	121
	Literaturverzeichnis	123
	Abbildungsverzeichnis	133
	Tabellenverzeichnis	135
	Anhang	137
	Danksagung	163

1 Einleitung

Experimente sind ein zentraler Bestandteil des naturwissenschaftlichen Unterrichts und können, je nachdem wo der inhaltliche Fokus liegt und welches didaktische Ziel verfolgt wird, unterschiedliche Funktionen einnehmen. Die wohl am häufigsten mit dem Experimentieren in Verbindung gebrachte Strategie der Hypothesenüberprüfung ist dabei nur eine von vielen (Höttecke & Rieß, 2015).

Auch wenn das Experimentieren im Schulunterricht nicht als direktes Abbild der Arbeitsweisen naturwissenschaftlicher Forschung beschrieben werden kann, so stellen Experimente für den Unterricht grundlegende Erkenntnisquellen dar, so wie das für die Wissenschaft auch der Fall ist (Girwidz, 2020a).

Für das im Physikunterricht zentrale Thema des Aufbaus der Materie stellt sich jedoch die Frage, welche Form die Erkenntnisse annehmen, die zu diesem Thema anhand von Experimenten gemacht werden können. Schließlich kann Materie auf einer submikroskopischen Ebene nicht direkt beobachtet werden, es können höchstens Hinweise gefunden werden, die für einen strukturierten Aufbau der Materie sprechen.

Welche dieser experimentellen Hinweise für Schüler*innen überzeugend sind, ist die zentrale Fragestellung dieser Arbeit. Dabei ist unumgänglich, auch die Modelle zu thematisieren, die für die Beschreibung des Aufbaus der Materie im Unterricht eingesetzt werden. Diese sind Teil eines Spannungsfeldes, welches sich aufgrund der Kompromisse auftut, die bei der Elementarisierung komplexer Themen für den Unterricht gezwungenermaßen eingegangen werden. De Vos & Verdonk (1996) verdeutlichen dies folgendermaßen:

On the one hand, modern theories about the structure of matter are too complex or abstract for most secondary school students. On the other hand, the ideas these students are able to understand will often be rejected by experts as naive, if not false. (de Vos & Verdonk, 1996, S. 657)

Aus diesem Grund steht der naturwissenschaftliche Unterricht vor der Herausforderung, den Aufbau der Materie auf eine verständliche Weise einzuführen, ohne dabei Vorstellungen zu fördern, die dem Verständnis fortgeschrittener Theorien in der späteren Schullaufbahn im Wege stehen.

1 Einleitung

Die Analyse von Experimenten, die für solch eine Einführung des Teilchenmodells geeignet sind, ist der Fokus dieser Arbeit. In einer vergleichenden Betrachtung wird dabei der Schwerpunkt auf die wahrgenommene Überzeugungskraft der Experimente gelegt. Es werden jedoch auch weitere Aspekte untersucht, wie die inhaltliche Schwierigkeit der Experimente und die Komplexität des Versuchsaufbaus.

Um den dafür benötigten theoretischen Rahmen aufzuspannen, werden im ersten Teil dieser Arbeit die relevanten lernpsychologischen Grundlagen vorgestellt, mit besonderem Fokus auf den kognitiven Prozessen, die am Aufbau fachlicher Konzepte und insbesondere dem Teilchenkonzept beteiligt sind (Kapitel 2.1). Dabei wird auch das Lernen mit digitalen Inhalten thematisiert (Kapitel 2.2), was im späteren Kapitel zum Experimentieren im Physikunterricht durch die Beschreibung digitalisierter Experimente vertieft wird (Kapitel 4.2).

Die restlichen Kapitel des Theorieteils widmen sich zum einen dem Konstrukt der Überzeugungskraft (Kapitel 2.3) und einer Beschreibung des Teilchenmodells der Materie aus fachlicher und fachdidaktischer Perspektive (Kapitel 3).

Der zweite Teil der Arbeit stellt die empirische Erhebung und deren Ergebnisse vor, die im Rahmen dieses Promotionsprojektes in mehreren Klassen der achten Jahrgangsstufe durchgeführt wurde. Die leitenden Forschungsfragen und die Vorstellung des Studiendesigns sind in Kapitel 5 aufgeführt. Ebenso werden an der Stelle die ausgewählten Experimente zum Teilchenmodell und deren Gestaltung als interaktive Experimentiervideos vorgestellt.

Nach einer Beschreibung der eingesetzten Erhebungsmethoden werden in Kapitel 6.4 die zu überprüfenden Forschungshypothesen vorgestellt, woraufhin die Vorstellung der Ergebnisse (Kapitel 7) und deren Interpretation folgen (Kapitel 8).

Theoretischer Teil

2 Lerntheoretische Grundlagen

Eine der grundlegenden Ausgangsfragen der Pädagogischen Psychologie ist, was es bedeutet zu lernen. Auch wenn sich verschiedene Lerntheorien darüber einig sind, dass Lernen ein Prozess ist, der unmittelbar an Erfahrungen gebunden ist und eine nachhaltige Veränderung des Verhaltenspotenzials¹ zur Folge hat, so gibt es verschiedene Auffassungen darüber, was diesen Lernprozess genau ausmacht oder welchen Gesetzmäßigkeiten er unterliegt (Hasselhorn & Gold, 2022). Für die vorliegende Arbeit ist ein genauerer Blick in zumindest eine Auswahl von lerntheoretischen Annahmen von Interesse, insbesondere mit Bezug auf die Rolle von individuellen Vorstellungen auf den Lernprozess.

Dass individuelle Vorstellungen über ein Thema für das Lernen dieses Themas relevant sind, findet sich in zahlreichen Lerntheorien wieder. So ist beispielsweise in der Grundannahme, dass Lernen ein Prozess des Wissenserwerbs ist, der Abgleich von neu aufgefassten Informationen mit bereits vorhandenem Wissen ein wesentlicher Schritt erfolgreichen Lernens und für die Festigung des neuen Wissens nötig (Hasselhorn & Gold, 2022). Wissenserwerb wird hier jedoch aus einer kognitionspsychologischen Perspektive betrachtet, bei der mentale Bilder des Reizmaterials „als Resultate von Informationsverarbeitung in Form von Regeln und Konzepten produziert und gespeichert werden“ (Hasselhorn & Gold, 2022, S. 60).

Die inzwischen am häufigsten vertretene Auffassung darüber, wie Lernen funktioniert, erweitert diese Vorstellung des Wissenserwerbs mit einer konstruktivistischen Sichtweise. Diese schreibt lernenden Personen eine aktive Rolle zu. Sie konstruieren das Wissen selbst, durch eine „aktive mentale Auseinandersetzung mit dem Lerngegenstand“ (Renkl, 2020, S. 6) und sind nicht lediglich automatisch ablaufenden Informationsverarbeitungsprozessen ausgesetzt.

Diese Perspektive der aktiven Informationsverarbeitung hat ihren Ursprung in den Ideen von zahlreichen Lerntheoretikern, unter ihnen auch Jean Piaget (Hasselhorn & Gold, 2022).

¹ Das Lernergebnis äußert sich nicht zwangsläufig in unmittelbar beobachtbarem Verhalten. Deshalb ist hier von einem Verhaltenspotenzial die Rede und nicht von dem Verhalten selbst (s. Hasselhorn & Gold, 2022, S. 36).

2 Lerntheoretische Grundlagen

Die kognitiven Vorgänge, die für solch eine aktive Informationsverarbeitung gebraucht werden, werden mithilfe des sogenannten Arbeitsspeichers oder Arbeitsgedächtnisses beschrieben. Dieses ist dafür verantwortlich, aus den von außen aufgenommenen Daten die relevanten Informationen herauszuarbeiten und zu interpretieren. Dieser Schritt geschieht durch das Abgleichen mit dem individuellen Vorwissen aus dem Langzeitspeicher des Gedächtnisses (Renkl, 2020). Relevant für diesen Prozess ist auch die begrenzte Kapazität des Arbeitsspeichers (s. Kapitel 2.2.2).

Mit dieser konstruktivistischen Sicht auf das Lernen wird schnell ersichtlich, dass das Vorwissen und individuelle Vorstellungen eine bedeutende Rolle haben. Sie sind der Gegenstand, anhand dessen neue Informationen interpretiert und eingeordnet werden, und sie bilden deshalb in gewisser Weise die Rahmenbedingungen des aktiven Wissensaufbaus (Hasselhorn & Gold, 2022).

Mit dem Blick auf Themen, bei denen im Schulunterricht erfahrungsgemäß größere Schwierigkeiten bestehen, angemessenes Fachwissen aufzubauen, haben Forschungsergebnisse aus der Naturwissenschaftsdidaktik bereits früh gezeigt, dass vergleichsweise wenige und ähnliche (nicht wissenschaftliche) Vorstellungen zu diesen Themen bei Schüler*innen vorhanden sind. Da gemäß der konstruktivistischen Sichtweise diese Vorstellungen das weitere Lernen maßgeblich beeinflussen und dementsprechend Lehrsituationen für eine bestmögliche Unterstützung angepasst werden müssen, beschäftigt sich die fachdidaktische Forschung mit der themenspezifischen Untersuchung solcher Vorstellungen besonders intensiv seit den 1970ern (Schecker, Wilhelm, Hopf & Duit, 2018).

Aus der Untersuchung gängiger Schülervorstellungen zu fachlichen Themen entwickelte sich außerdem die Forschung zum sogenannten Conceptual Change, dem Konzeptwechsel. Mit Konzepten sind im Allgemeinen die mentalen Repräsentationen von Ideen gemeint, die als grundlegende Wissensstrukturen des Verstehens und der Emotionen vorliegen (Krajcik & Shin, 2023, S. 124). Die Conceptual Change-Forschung befasst sich mit tiefergehenden Fragen zum Konzeptverständnis bei Kindern, beispielsweise was ein Konzept ausmacht, wie starr diese Konzepte sind, ob sie in kleinere Teile aufgetrennt werden können oder jeweils als Ganzes bestehen, und, für die Disziplin der Naturwissenschaftsdidaktik wohl am relevantesten: wie sich wissenschaftliche Konzepte im Kontext „naiver“ Konzepte bei Schüler*innen entwickeln (diSessa, 2022). Im Folgenden wird auf die

Conceptual Change-Forschung näher eingegangen, mit einem speziellen Blick auf die Entwicklung wissenschaftlicher Konzepte zum Thema Struktur der Materie.

2.1 Conceptual Change

Die Conceptual Change-Forschung hat ihren Ursprung in der Arbeit von Thomas Kuhn (1970, zitiert nach diSessa, 2022; Vosniadou, 2013a), in der er die Umstände betrachtet, die für die Veränderung von wissenschaftlichen Theorien verantwortlich sind (Vosniadou, 2013a). Nach ihm agieren Theorien in der Wissenschaft im Rahmen geteilter Vorstellungen, Annahmen, Verpflichtungen und Praktiken, die sich unter dem Begriff „Paradigma“ zusammenfassen lassen. Wenn sich nun über die Zeit hinweg wissenschaftliche Entdeckungen ansammeln, die nicht in das vorherrschende Paradigma passen, dann betritt die Wissenschaft eine Krisenzeit, die nur durch einen Paradigmenwechsel gelöst werden kann. Als Beispiele für solche wissenschaftlichen Umbrüche nennt Kuhn bedeutende Theorien verschiedener Disziplinen: Newtons Gesetze aus der Physik, Kopernikus' Theorie aus der Astronomie, Darwins Evolutionstheorie aus der Biologie. In all diesen Fällen wurden neue Ansätze entwickelt, um bereits bekannte oder neue Phänomene zu erklären. Es musste ein Paradigmenwechsel, ein Conceptual Change stattfinden, damit angemessen auf die derzeit aktuellen Erkenntnisse eingegangen werden konnte (Thagard, 1992, zitiert nach Vosniadou, 2013a).

Ausgehend von dieser wissenschaftshistorischen und -philosophischen Betrachtung fand sich die Idee des Conceptual Change auch in Arbeiten der Entwicklungspsychologie und Naturwissenschaftsdidaktik wieder (Vosniadou, 2013a). Posner, Strike, Hewson und Gertzog (1982, zitiert nach diSessa, 2022; Vosniadou, 2013b) formulierten die Theorie, der zufolge die Konzepte von Lernenden ähnlich zu betrachten sind wie die Konzepte von Wissenschaftler*innen: An bestehenden Vorstellungen wird so lange festgehalten, bis die Gründe, diese aufzugeben, gut genug sind (diSessa, 2022). Dementsprechend besteht die Theorie von Posner et al. aus vier Bedingungen, die erfüllt sein müssen, damit Conceptual Change stattfinden kann: (1) Die Lernenden müssen mit den bereits vorhandenen Vorstellungen unzufrieden sein, (2) es muss eine alternative Vorstellung geben, die logisch und verständlich ist, (3) die neue Vorstellung muss darüber hinaus intuitiv plausibel sein und (4) die neue Vorstellung sollte für neue Situationen fruchtbar, also erfolgreich sein (Posner et al., 1982, zitiert nach Duit, 2015).

2 Lerntheoretische Grundlagen

Auch wenn die Theorie von Posner et al. nach eigenen Angaben bloß erkenntnistheoretischer Natur ist, keine psychologische Realität widerspiegelt und nicht als Anleitung für unterrichtliche Gestaltung gedacht war (diSessa, 2022), beeinflusste sie in den folgenden Jahren die Ausrichtung naturwissenschaftlicher Forschung und Lehre maßgeblich (Vosniadou, 2013b). Sie wurde Teil des später so genannten „klassischen“ Conceptual Change-Ansatzes, welcher Vorstellungen von Schüler*innen ähnlich wie wissenschaftliche Vorstellungen behandelt: Die Schüler*innen sollen durch Evidenz von der „korrekten“ Sichtweise überzeugt werden (Vosniadou, 2013b). Da laut dieses Ansatzes eine Unzufriedenheit mit der bisherigen Vorstellung bestehen muss, wurde die Erzeugung eines sogenannten kognitiven Konflikts eine gängige Lehrmethode (Vosniadou, 2013b).

Auch wenn sich dieser Ansatz oder Teile dieses Ansatzes in aktuellen Lehrbüchern beispielsweise der Naturwissenschaftsdidaktik (z. B. in Kircher, Girwidz & Häußler, 2015) noch häufig wiederfinden, hat sich die Conceptual Change-Forschung in verschiedene Richtungen weiterentwickelt. Neben der direkten Konfrontation mit Fehlvorstellungen, mit der Absicht diese zu ersetzen (Smith et al., 1993, zitiert nach Vosniadou, 2013b), standen über die darauffolgenden Jahre auch alle weiteren Hauptpunkte des klassischen Ansatzes unter Kritik (Vosniadou, 2013b): Forschende beschrieben Conceptual Change nicht als Phänomen, das plötzlich und radikal stattfindet, sondern langsam und schrittweise (Caravita & Halden, 1994; Vosniadou & Brewer, 1992, zitiert nach Vosniadou, 2013b). Fehlvorstellungen wurden nicht als falsche oder missverstandene Theorien betrachtet, sondern als fehlerhafte Erweiterungen produktiven Wissens (Smith, diSessa & Roschelle, 1993, zitiert nach Vosniadou, 2013b). Neben kognitiv-rationalen Faktoren wurde auch die Wichtigkeit affektiver und motivationaler Faktoren für einen Conceptual Change betont (Pintrich, Marx, & Boyle, 1993; Sinatra & Pintrich, 2003, zitiert nach Vosniadou, 2013b) und dass soziale und situationale Aspekte ebenfalls eine signifikante Rolle spielen (Hatano & Inagaki, 2003, zitiert nach Vosniadou, 2013b).

Untersuchungen dieser und weiterer Aspekte des Conceptual Change führten die Theorien in der Forschung der vergangenen Jahrzehnte in verschiedene Richtungen. Dennoch lassen sich die gängigsten Theorien im Wesentlichen zwei Arten von Ansätzen zuordnen (diSessa, 2022; Özdemir & Clark, 2007): dem theoriebasierten Ansatz und dem fragmentbasierten Ansatz. Der eine ordnet Wissen eine theorieartige Struktur zu, während der andere von einem eher fragmentartigen Aufbau

ausgeht. Die zwei Ansätze unterscheiden sich also in ihren Auffassungen darüber, wie Wissen aufgebaut wird, wie es strukturiert ist und wie es verändert werden kann. Es gibt allerdings auch grundlegende Annahmen, die die beiden Ansätze eint, zum Beispiel, dass Lernende in ihrem individuellen Wissensaufbau maßgeblich durch alltägliche Erfahrungen beeinflusst werden und dass die „naiven“ Konzepte, die dadurch entstehen, auch das Wissen der Lernenden, das sie im Rahmen des Schulunterrichts aufbauen, beeinflussen. Die zwei Theorieansätze sind sich außerdem darin einig, dass individuelle Vorstellungen in der Regel schwer zu ändern sind und dies einen zeitaufwändigen Prozess benötigt (Özdemir & Clark, 2007).

Die Vorstellungen darüber, wie Wissen aufgebaut ist und verändert werden kann, sind nicht nur für die Forschung, sondern auch für die Gestaltung von Lernsituationen und -materialien ausschlaggebend. In den folgenden Unterkapiteln wird deshalb auf die relevantesten Aspekte beider Theorieansätze eingegangen.

2.1.1 Der theoriebasierte Ansatz

Den theoriebasierten Ansatz zeichnet in erster Linie die Annahme aus, dass naives Wissen bei Kindern in strukturierter Form vorliegt, mit Ähnlichkeiten zu einer wissenschaftlichen Theorie. Auch wenn mehrere prominente Theorien grundsätzlich diesem Ansatz zugeordnet werden können (beispielsweise Chi, 2005; Ioannides & Vosniadou, 2002; Carey, 1999, zitiert nach Özdemir & Clark, 2007), so gibt es innerhalb dieses Ansatzes differenzierte Vorstellungen zu dem Conceptual Change-Vorgang.

Careys *The Origin of Concepts* (2009) ist das wohl prominenteste Beispiel einer rein theoriebasierten Sichtweise und wird oft als Vertreter des sogenannten Theory Theory-Ansatzes genannt (s. diSessa, 2022; Vosniadou, 2013b). So wie andere Theory Theory-Ansätze, beschreibt der von Carey, dass Konzepte bei Kindern in theoretische Strukturen eingebettet sind und dass Conceptual Change dann stattfindet, wenn diese Konzepte im Licht neuer Theorien reinterpretiert werden müssen (Carey, 2008, zitiert nach Vosniadou, 2013b). Dabei liegt oft das Problem der Inkommensurabilität vor, der Unvergleichbarkeit eines neuen konzeptuellen Systems mit dem alten. Inkommensurabilität beschreibt also die Beziehung zwischen diesen beiden Systemen: Das eine besteht nicht nur aus Konzepten, die in dem anderen fehlen, die Konzepte können aus Sicht des jeweils anderen Systems nicht einmal beschrieben werden, sie sind nicht interpretierbar (Carey, 2009). Die Idee

2 Lerntheoretische Grundlagen

der Inkommensurabilität hat ihren Ursprung in den Arbeiten von Kuhn (1970, zitiert nach diSessa, 2022).

Um das Problem der Inkommensurabilität zu lösen, bietet Carey (2009) das sogenannte Quinian Bootstrapping als Prozess des Konzeptwechsels an (benannt nach dem Philosophen Willard Van Orman Quine). Wortwörtlich genommen beschreibt der Begriff die Idee des unmöglichen Vorgangs, sich an den eigenen Stiefelriemen, den bootstraps, hochzuziehen. Er wurde als Bild gewählt, um auf die hohe Schwierigkeit hinzuweisen, die mit der Erstellung völlig neuer Konzepte einhergeht, wenn diese neuen Konzepte nicht in den vorangehenden fundiert sind (Carey, 2009, S. 22). Es wird also ein Lernmechanismus beschrieben, der nicht lediglich bereits bekannte Konzepte auf neue Art kombiniert, sondern etwas neues erschafft (Wiser & Smith, 2016, S. 2f).

Quinian Bootstrapping kann im Wesentlichen heruntergebrochen werden auf mehrere Schritte (ebd., S. 3): Es umfasst immer explizite Symbole, die als Platzhalter für neue Konzepte dienen und sich bestenfalls nur teilweise durch bereits bekannte Konzepte interpretieren lassen. Bootstrapping macht sich die Fähigkeit einer Person zunutze, (a) neue Symbole zu generieren oder zu erlernen, und (b) neue Verbindungen zwischen diesen Symbolen in Form von Sätzen oder Gleichungen zu entdecken oder vermittelt zu bekommen. Diese dienen dann als größere Platzhalter-Strukturen und stellen Informationen über die Beziehungen zwischen den Konzepten bereit. Im letzten Teil des Bootstrapping-Prozesses wird (c) eine Interpretation der Symbole vorgenommen, durch eine Reihe koordinierter Vorgänge: dem Herstellen von Analogien, dem Durchführen von Gedankenexperimenten, dem induktiven und abduktiven Schlussfolgern. All diese Vorgänge haben das Ziel, Verbindungen zwischen den neuen mentalen Repräsentationen herzustellen und sind dann erfolgreich, wenn sie angemessen orchestriert und mit dem Zweck eingesetzt werden, ein neues Konzept zu erlernen (ebd.).

Als Szenarien, in denen Bootstrapping-Prozesse für das Lernen verwendet werden sollten, nennt Carey die Mathematik und naturwissenschaftlichen Fächer. Der Grund dafür liegt darin, dass diese Fächer typischerweise neuartige, alltagsferne Konzepte beinhalten, für deren Verständnis ein Conceptual Change nötig ist (Carey, 2009, S. 436ff). Als Beispiel dafür, wie das funktionieren kann, weist Carey auf Studien von Kolleg*innen hin, unter anderem Smith (2007), die ein sich an Bootstrapping-Mechanismen bedienendes mehrwöchiges Curriculum zum Thema

Volumen und Gewicht von Gegenständen entwickelt und eingesetzt hat (Carey, 2009, S. 439ff).

Neben solchen experimentellen Momentaufnahmen („snapshot studies“), wie sie von diSessa genannt werden (diSessa, 2022, S. 126), ist die Arbeit von Carey vor allem entwicklungswissenschaftlicher Natur. Das lässt sich auch daran erkennen, dass ein Hauptfokus ihrer Theorie auf der Beschreibung des Ursprungs von Konzepten bei sehr jungen Kindern liegt. Sie geht davon aus, dass mentale Repräsentationen nicht lediglich durch sensorische Reize entstehen, sondern dass es auch angeborene Repräsentationen („conceptual representations“) gibt (Carey, 2011). Diese sogenannten developmental primitives unterscheiden sich von Repräsentationen, die durch äußere Reize entstehen, da sie konzeptionellen Inhalt in sich tragen und die sogenannte core cognition (Kernkognition) bilden (Carey, 2011).

Neben Konzepten der core cognition beschreibt Carey auch Repräsentationen sogenannter intuitiver Theorien, die sich von der core cognition unter anderem dadurch unterscheiden, dass sie nicht angeboren sind und sich erst später entwickeln. Sie sind zwar auch durch feste Strukturen organisiert, diese sind jedoch nicht über die Kindheit hinweg konstant (Carey, 2009, S. 22). Damit erinnern die Überlegungen von Carey an die Framework Theory von Vosniadou (z. B. 2013b) welche ebenfalls einen theoriebasierten Ansatz verfolgt und in der wissenschaftlichen Community zu den am häufigsten unterstützten gehört (Potvin et al., 2020).

Auch die Framework Theory beschreibt das Wissen von Kindern als theorieartig vernetzt. Anders als bei Carey (2009) wird dabei jedoch nicht der Frage nachgegangen, ob naive Konzepte angeborenen Ursprungs sind, der Fokus liegt stattdessen auf älteren Kindern und auf der Frage nach der Reorganisation ihres Wissens, besonders im Kontext von Unterricht (Vosniadou, 2013b).

Die Framework Theory beschreibt den Prozess des Wissenserwerbs als die Konstruktion einer „naiven Physik“, die nicht lediglich aus bruchstückhaften Beobachtungen besteht, sondern ein in sich relativ stimmiges Netzwerk, eine framework theory (Rahmentheorie) bildet (ebd., S. 13). Neben der Physik nennt Vosniadou noch drei weitere Domänen, in welchen schon im frühen Kindesalter framework theories aufgebaut werden: Psychologie, Mathematik und Sprache.

Diese framework theories sind definiert als gerüstartige Strukturen, die aus den grundlegendsten ontologischen Festlegungen bestehen, hinsichtlich derer sich jede

2 Lerntheoretische Grundlagen

Person die Welt um sich herum erklärt (ebd.). Sie sind inhaltlich verhältnismäßig stimmig, prinzipienbasiert und durch eine ausgeprägte Kausalität und Ontologie charakterisiert, die in der Lage ist, Vorhersagen und Erklärungen hervorzubringen (ebd.). Gleichzeitig unterscheiden sie sich jedoch von wissenschaftlichen Theorien. Sie sind keine expliziten, ausformulierten Konstrukte, die Teil eines sozialen Netzwerkes sind, welches diese systematisch auf ihre Falsifizierbarkeit überprüft. Außerdem fehlt ihnen die Erklärungskraft und interne Konsistenz wissenschaftlicher Theorien (ebd.).

Als Beleg für die Existenz von framework theories führt Vosniadou beispielhaft Studien auf, die gezeigt haben, dass in bestimmten Themengebieten der Physik Lernende typischerweise einheitliche vorunterrichtliche Vorstellungen aufweisen, die in framework theories einer „naiven Physik“ verankert zu sein scheinen (ebd.). Durch schulischen Unterricht kommen die Lernenden dann mit wissenschaftlichen Sichtweisen in Kontakt, für deren Verständnis sie ihre bisherigen Konzepte neuen ontologischen Kategorien zuordnen müssen. Die Konzepte Kraft, Energie und Wärme beispielsweise, die in den naiven Vorstellungen typischerweise mit etwas Gegenständlichem gleichgesetzt werden, müssen der Kategorie der Prozesse oder Wechselwirkungen zugeordnet werden (Chi, 2008, Wiser & Smith, 2008, zitiert nach Vosniadou, 2013b). Dieses Umorganisieren ontologischer Kategorien ist ein aufwändiger Prozess, da er von starken repräsentationalen und epistemologischen Veränderungen begleitet wird (Vosniadou, 2013b, S. 15).

All das ist laut Vosniadou (2013b) dafür verantwortlich, dass Conceptual Change ein gradueller und langsamer Prozess ist, der vor allem durch sogenannte Bereicherungsmechanismen („enrichment mechanisms“) geschieht, die neue, bisher unvereinbare Informationen zu den bereits vorhandenen Konzeptstrukturen hinzufügen. Diese Mechanismen unterscheiden sich von dem durch Careys (2009) Theorie beschriebenen Quinian Bootstrapping und können das Auftreten von fragmentiertem Wissen und Fehlvorstellungen („misconceptions“) bei den Lernenden erklären (Vosniadou, 2013b, S. 23).

Mit fragmentiertem Wissen ist gemeint, dass ursprüngliche naive Vorstellungen unverändert weiterbestehen und die neuen wissenschaftlichen Informationen einfach hinzugefügt werden, auch wenn sie der naiven Vorstellung widersprechen. Ein Beispiel dafür ist, wenn Kinder akzeptieren, dass sich die Erde um die eigene

Achse dreht, aber gleichzeitig weiterhin die Vorstellung behalten, dass die Sonne beim Untergang senkrecht hinter den Bergen verschwindet (Vosniadou, 2013b).

Schülervorstellungen entstehen, wenn die neuen Informationen nicht neben den bestehenden Vorstellungen bestehen, sondern mit diesen durch eine inhaltliche Vermischung neue, sogenannte synthetische Modelle bilden. Diese synthetischen Modelle haben die Fähigkeit die Inkommensurabilität zwischen den naiven Vorstellungen und den wissenschaftlichen Informationen zu überwinden, indem sie zwar oft inkorrekte aber dennoch kreative Lösungen anbieten (Vosniadou, 2013b). Sie können also als eine Art Zwischenstufe verstanden werden, die von den anfänglichen Vorstellungen zu den wissenschaftlich erwünschten führt. Vosniadou beschreibt die synthetischen Modelle außerdem als dynamisch und in einem Zustand ständiger Veränderung. Sie verschleiern inhaltliche Widersprüche und sind damit hilfreiche Werkzeuge für die Lernenden, ein vorliegendes Problem zu lösen. Trotz ihrer inhaltlichen Inkorrektheit können sie damit für den Conceptual Change hilfreich sein (ebd.).

2.1.2 Der fragmentbasierte Ansatz

Die wohl bekannteste Vertreterin einer fragmentbasierten Theorie ist diSessas *Knowledge in Pieces* (z. B. 2018). Auch wenn sie zu Beginn der Conceptual Change-Forschung im Bildungsbereich nicht weit verbreitet war (Driver, 1989; C. Smith et al., 1997, zitiert nach diSessa, 2022, S. 123), zählt sie inzwischen zu den Theorien mit der größten Unterstützung aus der wissenschaftlichen Community (Potvin et al., 2020).

diSessas Theorie zeichnet sich insbesondere durch die Vorstellung aus, dass Wissen weniger zusammenhängend vorliegt als in theoriebasierten Ansätzen. Stattdessen vertritt sie den Standpunkt, dass naive Physik aus hunderttausenden kleinen Elementen besteht, den *phenomenological primitives* oder *p-prims* (diSessa, 2022, S. 123). Diese werden als lose geordnet beschrieben, oft stark kontextabhängig und deutlich weniger komplex und zusammenhängend als es bei einer theoriebasierten Sicht der Fall wäre (ebd.).

Wenn Lernende also beispielsweise an Phänomene denken, die mit Kräften und Bewegung zu tun haben, können je nach Situation verschiedene p-prims hervorgerufen und aktiviert werden: zum einen kann *Kraft treibt an* aktiviert werden –

die Vorstellung, dass ein direkter Impuls einen Gegenstand in Bewegung versetzt, zum anderen kann das p-prim *ausklingen* aktiviert werden – die Vorstellung, dass jede Bewegung nach einer gewissen Zeit ausklingt (Chinn & Iordanou, 2023, S. 102). Dabei muss sich keine zusammenhängende Struktur zwischen den p-prims bilden. Je nach Situation setzen sie sich auf unterschiedliche Art zusammen. Demnach ist auch der Conceptual Change kein Erstellen neuer, strukturierter Ideen, sondern ein allmählicher Prozess, durch den Lernende die Anwendungsbereiche schon existierender p-prims verschieben und anpassen (ebd.).

Auf diese Weise geht der Ansatz von diSessa dem Problem der Inkommensurabilität aus dem Weg. Naive Vorstellungen werden nicht als theorieartig vernetzt angesehen, sondern als eine Ansammlung von p-prims, wodurch die Inkommensurabilität ihre Bedeutung verliert (diSessa, 2022, S. 125). Diese muss demnach auch nicht von Lernenden auf dem Weg zu wissenschaftlichen Konzepten überwunden werden. Stattdessen müssen Lernende vielfältige Erfahrungen sammeln, bei denen sie die Wissens Elemente in unterschiedlichen Kontexten erlernen. Das führt allmählich zu einer Entwicklung der Konzepte (ebd.). Eine gewisse Struktur zwischen den p-prims ist dennoch gegeben, schließlich müssen sie ihren Platz und den Bezug zu anderen Elementen des Konzeptes finden (ebd.).

Auch wenn die Theorie von diSessa auf viele physikalische Themenbereiche angewandt wurde und im Zusammenhang mit der Erstellung und Untersuchung von Instruktionssituationen und -material entstand (diSessa, 2022, S. 129), finden sich nur wenige Beispiele zum Thema Struktur der Materie. Aufgrund der Erkenntnisse, die aus der Schülervorstellungsforschung vorliegen, liegt die Folgerung nahe, den Lernprozess von Kindern zu diesem Themengebiet anhand einer theoriebasierten Annahme des Wissensaufbaus, wie der *Framework Theory* von Vosniadou (2013b), bzw. mit Hilfe sogenannter Learning Progressions, zu beschreiben.

2.1.3 Learning Progressions und das Teilchenmodell der Materie

Wie bereits erwähnt, wurden schon während der Anfänge der Conceptual Change-Forschung Vorstellungen zu physikalischen Themen untersucht, die Kinder bereits vor dem Schulunterricht besitzen (s. Kapitel 2.1). Von besonderem Interesse waren dabei Konzepte, die für Schüler*innen auch trotz Unterricht schwer zugänglich bleiben. Eines solcher naturwissenschaftlichen Themen ist der Aufbau der Materie. Zu ihm werden im Folgenden ausgewählte Ergebnisse der Conceptual

Change-Forschung zusammengefasst. Eine ausführlichere Diskussion zu diesem physikalischen Thema und eine breitere Aufführung von Schülervorstellungen sind in Kapitel 3 zu finden.

Die Arbeiten zum Conceptual Change bezogen auf das Thema Struktur der Materie von Wiser & Smith (2013, 2016) können als unterstützend für die Theorie von Carey (2009) beschrieben werden (s. auch diSessa, 2022, S. 127). Auch sie erkennen das Quinian Bootstrapping als Mechanismus des Conceptual Change an (s. Kapitel 2.1.1), wenn es darum geht, die Inkommensurabilität zwischen Konzepten von Schüler*innen und Wissenschaftler*innen zu überwinden (Wiser & Smith, 2016). Für den Fall des Themas Struktur der Materie merken sie an, dass dieser Mechanismus jedoch erweitert werden muss. Sie behaupten, dass die Schüler*innen selten über die nötigen metakognitiven, epistemologischen und mathematischen Ressourcen verfügen, die für einen produktiven Bootstrapping-Prozess nötig sind. Außerdem sind viele Fachbegriffe, wie zum Beispiel „Wärme“, in ihrer Bedeutung weit von der alltäglichen entfernt, und Konzepte wie „Atom“, die kein alltägliches Gegenstück haben, können in starkem Widerspruch zu fest verwurzelten Vorstellungen stehen (ebd. S. 3). Aus diesen Gründen argumentieren sie dafür, den Bootstrapping-Prozess durch eine stärkere Berücksichtigung vorunterrichtlicher Vorstellungen zu erweitern und das Problem der Unverständlichkeit neuer Konzepte für Schüler*innen und des Zweifels an den neu eingeführten Platzhalterstrukturen dieser Konzepte zu adressieren (ebd. S. 3f).

Darüber hinaus folgen sie der Entwicklung in der Conceptual Change-Forschung, die zu einem gewissen Grad die Mitte zwischen den beiden Ansätzen (theorie- und fragmentbasiert) sucht (Özdemir & Clark, 2007). Das lässt sich dadurch erkennen, dass ihre theoretischen Überlegungen zum einen zu der *Framework Theory* von Vosniadou (2013b) passen und sie auch von synthetischen Modellen sprechen (s. z. B. Wiser & Smith, 2013, S. 189f). Zum anderen schließen sie in ihre Betrachtungen auch die p-prims aus der Theorie von diSessa (2018) mit ein (s. Wiser & Smith, 2016, S. 7).

Um den Conceptual Change und damit das Lernen zum Thema Struktur der Materie optimal zu unterstützen, schlagen Wiser & Smith (2013, 2016) vor, sich an sogenannten Learning Progressions (Lernverläufe) zu orientieren. Learning Progressions (LP) beschreiben mögliche Lerntrajektorien, die Schüler*innen ausgehend von einem ursprünglichen, über mehrere dazwischenliegende, bis hin zu

2 Lerntheoretische Grundlagen

einem erwünschten Wissensstand führen sollen (Wiser & Smith, 2016, S. 8). Sie werden unter Berücksichtigung von Schülervorstellungen erstellt und es wird auf die Entwicklung dieser Vorstellungen über den Zeitraum der LP geachtet. Aus dem Grund können Forschende Hypothesen darüber aufstellen, welche Conceptual Changes nötig sind, damit die Lücke zwischen ursprünglichen, naiven Vorstellungen und dem wissenschaftlich erwünschten Verständnis überbrückt wird und können Lerninhalte und -umgebungen vorschlagen, die dies unterstützen sollen (ebd.).

Dabei ist jedoch zu beachten, dass LP Modelle darstellen (Bernholt, Neumann & Sumfleth, 2018, S. 216). Sie sollen weder im Sinne Piagets eine Stufentheorie sein, noch genaue Denkmuster von Lernenden zusammenfassen (ebd.). Aus diesem Grund sind sie in ihrem Gültigkeitsbereich beschränkt und haben nicht den Anspruch, alle Einflussfaktoren auf den Lernprozess abzubilden, bzw. zu berücksichtigen (ebd.). Sie können jedoch als Beschreibung eines idealtypischen Fortschritts einer Lerngruppe angesehen werden, die den Zweck hat, passende Instruktionsmaßnahmen hervorzubringen (Lehrer & Schauble, 2015, zitiert nach Bernholt et al., 2018, S. 216).

Learning Progressions modellieren also den Lern- und Lehrvorgang in der jeweiligen fachlichen Domäne über einen längeren Zeitraum hinweg (Bernholt et al., 2018, S. 212). Dabei ist jedoch nicht nur die Vermittlung von Wissen von Bedeutung, sondern auch die Entwicklung der Fähigkeiten, dieses Wissen auf verschiedene Bereiche anwenden zu können (Smith et al., 2006; Songer et al., 2009; Schwarz et al., 2009, zitiert nach Bernholt et al., 2018, S. 213). Dafür wird den LP durch die Festlegung von Lernzielen und zu erreichenden Kompetenzen eine Struktur gegeben. Ausgangspunkt ist jeweils der Wissensstand der Lernenden zu Beginn der LP, welcher typischerweise durch vorunterrichtliche Alltagsvorstellungen geprägt ist und „lower anchor“ genannt wird (Duschl et al., 2007, zitiert nach Bernholt et al., 2018, S. 213). Das Ziel der LP, der „upper anchor“, ist ebenfalls inhaltlich definiert. Damit haben LP stets einen klaren Start- und Endpunkt (ebd.).

Für die Bestimmung der inhaltlichen Zwischenschritte, die für das Erreichen des erwünschten Endpunktes nötig sind, richten sich LP zwar größtenteils nach dem kanonischen Wissen der Referenzdisziplin (Hammer & Sikorski, 2015, zitiert nach Bernholt et al., 2018, S. 215), teilweise jedoch auch nach Erkenntnissen aus empirischen Untersuchungen der Schülervorstellungsforschung. Für das Thema Struktur

der Materie ist das in den Arbeiten von Wiser & Smith (2013, 2016) und zum Beispiel Hadenfeldt, Neumann, Bernholt, Liu & Parchmann (2016) erkennbar. Sie stützen sich auf die Annahme, dass die Entwicklung von Vorstellungen zum Aufbau der Materie über mehrere Jahrgangsstufen hinweg eine Reihe von ausformulierten Stufen durchläuft, von naiven Alltagsvorstellungen, über hybride Konzepte, bis hin zu systemischen Teilchenvorstellungen (Hadenfeldt et al., 2016).

In diesem Sinne sollen LP nicht nur für die Entwicklung von passenden Instruktionen, sondern auch als theoretische Grundlage von Diagnosewerkzeugen dienen (Bernholt et al., 2018, S. 213). Auf diesem Hintergrund basiert auch das Messinstrument von Hadenfeldt et al. (2016), welches den Wissensstand von Lernenden anhand von gängigen Vorstellungen zum Aufbau der Materie einem Verständnisniveau zuordnet (für eine detailreichere Beschreibung des Messinstruments, s. Kapitel 6.1).

2.2 Lernen mit digitalen Inhalten

Von der Betrachtung ausgehend, dass Lernen mit der Verarbeitung äußerer Reize beginnt (s. Kapitel 2), ist die Frage naheliegend, welche Art von Reiz- bzw. Lernmaterial für ein gewünschtes Lernergebnis zielführend ist. Beachtet man die Rolle des Arbeitsgedächtnisses für die Verarbeitung von Informationen und dessen begrenzte Kapazität, wird diese Frage noch relevanter. Schließlich ist eine unnötige Belastung des Arbeitsgedächtnisses durch ungeeignetes Material unerwünscht.

2.2.1 Cognitive Theory of Multimedia Learning

Die *Cognitive Theory of Multimedia Learning* (CTML) nach Mayer (2021) beschreibt den Prozess der Informationsverarbeitung, wenn mit multimedialen Lerninhalten gearbeitet wird. „Multimedial“ meint dabei, dass die Inhalte sowohl text- als auch bildbasiert sind, wobei sich „Text“ nicht nur auf gedruckten oder geschriebenen Text bezieht und mit „Bild“ nicht ausschließlich unbewegte Graphiken gemeint sind. Multimediales Material schließt zum Beispiel sowohl Lehrbücher bestehend aus Texten und Bildern mit ein als auch Online-Kurse bestehend aus gesprochenem Text und Animationen, interaktive Simulationen mit erklärenden Texten, oder Lehrszenarien in Virtual Reality (ebd. S. 57).

2 Lerntheoretische Grundlagen

Basierend auf der Theorie der dualen Kodierung nach Piavio (1986, zitiert nach Horz, 2020, S. 142) und unter Berücksichtigung des Modells des Arbeitsgedächtnisses nach Baddeley (1986, zitiert nach Horz, 2020, S. 142), beschreibt die CTML die Verarbeitung von multimedialen Informationen als einen zweigeteilten Prozess, der visuell-bildhafte und auditiv-verbale Daten in voneinander getrennten Kanälen verarbeitet, bevor er die daraus gewonnenen Informationen im Arbeitsgedächtnis mit den Informationen aus dem Langzeitgedächtnis integriert (Horz, 2020, S. 143).

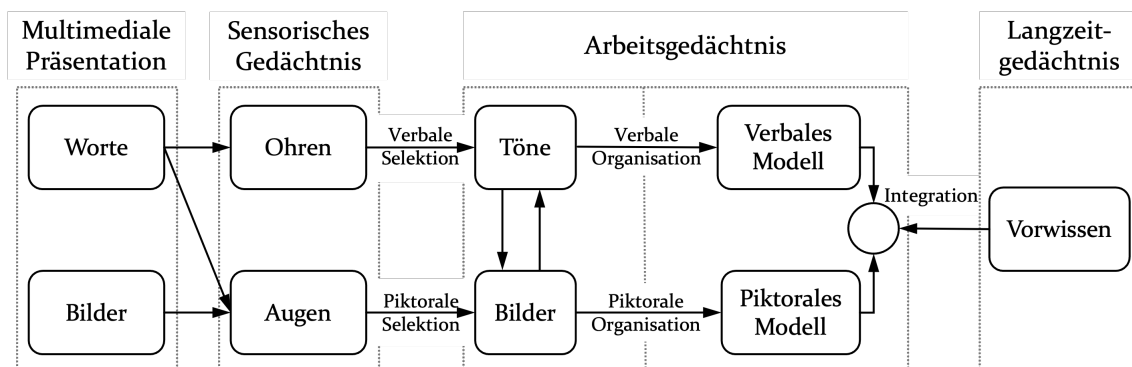


Abbildung 1: Modellhafte Darstellung der CTML, angepasst nach Mayer (2021), übersetzt nach Horz (2020)

Mit der Annahme, dass Lernen ein aktiver, konstruktivistischer Vorgang ist und das Lernmaterial auch aktiv genutzt wird, beschreibt Mayer (2021) drei kognitive Prozesse, die für die Verarbeitung der multimedialen Informationen hauptverantwortlich sind: Selektion, Organisation und Integration (s. beschriftete, verbindende Pfeile in Abbildung 1). Selektionsprozesse sind dafür verantwortlich, relevante Informationen auszuwählen und ins Arbeitsgedächtnis weiterzuleiten. Durch die Organisation dieser Informationen in kohärente Strukturen werden sie für die Integration miteinander und mit relevantem Vorwissen vorbereitet (Mayer, 2021, S. 62).

Die Selektions- und Organisationsprozesse sind jeweils zweigeteilt. Ausgehend von dem sensorischen Gedächtnis, in dem für nur sehr kurze Zeit Kopien eintreffender Worte und Bilder festgehalten werden, werden eine Auswahl dieser Kopien an das Arbeitsgedächtnis weitergeleitet. Dort, wie in Abbildung 1 auf der linken Seite des Arbeitsgedächtnisses dargestellt, sind diese Informationen als „Rohmaterial“ (Töne und Bilder) vorhanden. Die Pfeile zwischen diesen zwei Kästen stellen

die mentale Umwandlung von Tönen (zum Beispiel das gesprochene Wort „Katze“) in Bilder (das mentale Bild einer Katze) und umgekehrt, dar (Mayer, 2021, S. 63).

Die in Abbildung 1 rechte Seite des Arbeitsgedächtnisses repräsentiert das Wissen, das innerhalb des Arbeitsgedächtnisses konstruiert wird. Auch hier wird zwischen einem verbalen und einem piktoralen Teil unterschieden, wobei auch die Verbindungen zwischen den beiden berücksichtigt werden. Dass nun von einem „piktoralen“ und nicht von einem „bildlichen“ oder „visuellen“ Modell gesprochen wird, hat den Grund, dass damit keine visuellen Bilder gemeint sind, sondern „räumliche Repräsentationen“, die durch die Organisation der mentalen Bilder entstanden sind (ebd.). Der letzte, ganz rechte Teil der Abbildung stellt das Langzeitgedächtnis dar. In dem entscheidenden Schritt der Integration wird daraus das relevante Vorwissen aktiviert, abgerufen und mit den verbalen und piktoralen Modellen in Verbindung gebracht (ebd.).

Um nach der CTML erfolgreich mit multimedialen Materialien zu lernen, sind also fünf kognitive Prozesse nötig (ebd.): (1) die Selektion relevanter Worte, um diese dann im verbalen Arbeitsgedächtnis zu verarbeiten; (2) die Selektion relevanter Bilder, um diese dann im visuellen Arbeitsgedächtnis zu verarbeiten; (3) die Organisation der selektierten Bilder in ein verbales Modell; (4) die Organisation der selektierten Bilder in ein piktorales Modell; und (5) die Integration der verbalen und piktoralen Modelle miteinander und mit dem aus dem Langzeitgedächtnis aktivierten relevanten Vorwissen. Diese fünf Schritte müssen nicht in der hier aufgelisteten Reihenfolge stattfinden. Lernende können in sehr unterschiedlicher und dynamischer Weise zwischen den Prozessen wechseln (ebd.).

Der wohl wichtigste und ressourcenintensivste dieser Prozesse ist der fünfte, die Integration von wort- und bildbasierten Repräsentationen. Da dieser Schritt so herausfordernd ist, benötigt er eine effiziente Zuteilung kognitiver Ressourcen und wird durch die Motivation der lernenden Person unterstützt, sich die vorliegenden Inhalte aneignen zu wollen (ebd., S. 65).

Aus diesen Auffassungen darüber, wie der Informationsverarbeitungsprozess auf kognitiver Ebene stattfindet, lassen sich Prinzipien für die Gestaltung von Lernmaterialien ableiten. Eine grundlegende Annahme der Lernforschung zu Multimedia-Inhalten ist nämlich, dass diese Inhalte dann wirksamer vermittelt werden können,

2 Lerntheoretische Grundlagen

wenn sie unter Berücksichtigung dessen erstellt wurden, wie der Lernprozess auf kognitiver Ebene stattfindet (ebd., S. 57). Ausgehend von dieser Prämisse wird die CTML durch zahlreiche empirische Forschungsbefunde gestützt (Horz, 2020, S. 143).

Für die Erstellung von Materialien, die nach der CTML lernförderlich sind, muss darauf geachtet werden, dass sie die ablaufenden kognitiven Prozesse unterstützen und nicht zu einer Überforderung der begrenzten Kapazitäten des Arbeitsspeichers führen (ebd., S. 66). Dabei gibt es laut Mayer (2021) drei Arten der Beanspruchung auf die Informationsverarbeitung einer lernenden Person: das sogenannte *extraneous processing*, das *essential processing* und das *generative processing* (ebd.). Diese drei Kategorien der kognitiven Verarbeitung stehen analog zu den drei Arten der kognitiven Belastung der Cognitive Load Theory (s. Kapitel 2.2.2) und sind aus unterschiedlichen Gründen für eine erfolgreiche oder weniger erfolgreiche Informationsverarbeitung während des Lernprozesses verantwortlich.

Das *extraneous processing* beschreibt die kognitive Ressource, die aufgrund von mangelhaftem Instruktionsdesign beansprucht wird und im Sinne des Lernziels nicht nutzbringend ist. *Essential processing* meint die kognitive Verarbeitung, die dafür verantwortlich ist, das Reizmaterial im Arbeitsgedächtnis als mentale Repräsentationen zur Verfügung zu stellen und wird durch die inhaltliche Komplexität der Lernaufgabe bestimmt. *Generative processing* wird als kognitive Ressource beschrieben, die dafür benötigt wird, dem Lerninhalt eine Bedeutung zuzuschreiben. Sie wird dadurch bestimmt, wie motiviert die lernende Person im Lernprozess ist (ebd.).

Zusammengefasst gesagt, empfiehlt die CTML für das Erstellen von Lernmaterialien, drei Ziele im Blick zu behalten: *Extraneous processing* sollte reduziert werden, *essential processing* sollte verwaltet werden und *generative processing* sollte begünstigt werden (ebd., S. 68). Welche konkreten Designprinzipien sich diesen Zielen zuordnen lassen, sind beispielhaft in Tabelle 1 zu finden.

Tabelle 1: Auszug aus den Designprinzipien nach Mayer (2021), eigene Übersetzung

Ziel	Repräsentative Methode	Beschreibung der Methode
<i>Extraneous processing</i> reduzieren	Kohärenz-Prinzip	Irrelevantes Material entfernen
	Signal-Prinzip	Essenzielles Material hervorheben
	Überflüssigkeits-Prinzip	Keinen gedruckten Text zu gesprochenem Text hinzufügen
	Prinzip der räumlichen Nähe	Gedruckten Text neben entsprechender Graphik platzieren
	Prinzip der zeitlichen Nähe	Narration und entsprechende Graphik gleichzeitig anbieten
<i>Essential processing</i> verwalten	Aufteilungs-Prinzip	Präsentation in Segmente unterteilen
	Vorbereitungs-Prinzip	Begriffe und Eigenschaften von Kernelementen vor dem Unterricht beschreiben
	Modalitäts-Prinzip	Eher gesprochenen als gedruckten Text verwenden
<i>Generative processing</i> begünstigen	Multimedia-Prinzip	Worte und Bilder anstatt nur Worte verwenden
	Personalisierungs-Prinzip	Text im Gesprächsstil formulieren
	Stimmen-Prinzip	Menschliche Stimme für gesprochenen Text verwenden
	Prinzip der geleiteten Entdeckung	Hinweise und Feedback bereitstellen während Lernende Probleme lösen

2.2.2 Cognitive Load Theory

Die *Cognitive Load Theory* (CLT) von Sweller et al. (Sweller & Chandler, 1994; Sweller, van Merriënboer & Paas, 1998) ist die wohl bekannteste Theorie des Wissenserwerbs, in deren Mittelpunkt die Funktionsweise des Arbeitsgedächtnisses steht (Renkl, 2020, S. 10). Ähnlich, aber noch zentraler als bei der CTML, ist auch bei der CLT die Aufteilung verschiedener Ressourcen im Arbeitsgedächtnis, bzw. das Zusammenspiel verschiedener Arten kognitiver Belastung, für das Lernen ausschlaggebend. Dabei unterscheidet die CLT zwischen drei Arten der kognitiven Belastung: der intrinsischen („intrinsic“), der extrinsischen („extraneous“) und der lernbezogenen („germane“) Belastung.

2 Lerntheoretische Grundlagen

Der *intrinsic cognitive load* (ICL) entsteht durch die inhaltliche Komplexität des Lernstoffs, unabhängig davon, wie dieser Lernstoff präsentiert wird. Gestalterische Details in Bezug auf das Lernmaterial oder methodische Überlegungen, die das Lernsetting betreffen, fallen also für den ICL nicht ins Gewicht (Sweller, 2010, S. 124). Um den ICL zu verändern, müssen entweder der Lerninhalt oder das Vorwissen der lernenden Person verändert werden (ebd.).

Ausschlaggebend dafür, ob ein fachlicher Inhalt bei der lernenden Person einen hohen ICL beansprucht, ist die sogenannte *element interactivity*. Sie ist ein Maß dafür, wie viele Elemente des Lernstoffs, also kleinste Einheiten wie ein Konzept oder ein Vorgang, für das erfolgreiche Verarbeiten der Informationen gleichzeitig beachtet werden müssen (ebd.). Das Lernen von mehreren Vokabeln beispielsweise, oder von Symbolen chemischer Elemente, besitzt eine niedrige *element interactivity*, da die Informationen (in diesem Fall Vokabeln, bzw. chemische Elemente) unabhängig voneinander betrachtet werden können. Nimmt man hingegen das Lösen mathematischer Gleichungen als Beispiel, so beeinflussen sich mehrere Elemente gegenseitig, die zum erfolgreichen Lösen nötig sind: die einzelnen Terme der Gleichung, die Operatoren und in welcher Beziehung sie zueinander stehen. All das muss gleichzeitig beachtet werden, was die *element interactivity* der Aufgabe und damit den erfordernten ICL, erhöht (ebd.). An diesem Beispiel ist außerdem ersichtlich, inwiefern das individuelle Vorwissen für den ICL ausschlaggebend ist. Für erfahrene Personen ist das Lösen von mathematischen Gleichungen im Vergleich zu Laien deutlich einfacher, da sie durch ihre Erfahrung auf bereits entwickelte Schemata zurückgreifen können. Diese Schemata fassen Einzelinformationen zu Einheiten zusammen und lassen sich dadurch mit weniger Aufwand verarbeiten (Renkl, 2020, S. 10).

Der *extraneous cognitive load* (ECL) beschreibt die Belastung des Arbeitsgedächtnisses durch Merkmale des Lernmaterials. Auch ihm liegt *element interactivity* zugrunde (Sweller, 2010), welche in diesem Fall jedoch durch unpassendes Design der Lernmaterialien hervorgerufen wird (Paas & Sweller, 2021, S. 79). Ein erhöhtes Maß an interagierenden Elementen des Instruktionsdesigns, die nicht zum Wissenserwerb beitragen und insofern eine ablenkende Rolle spielen, führt dazu, dass die begrenzten Ressourcen des Arbeitsgedächtnisses unnötig stark in Anspruch genommen werden (ebd.). Das führt insbesondere dann zu Problemen, wenn die vorliegende Aufgabe einen hohen ICL von der lernenden Person abverlangt. Dann

kann es nämlich zu einem sogenannten kognitiven *overload* kommen, einer Überlastung des Arbeitsgedächtnisses mit daraus folgenden schweren Beeinträchtigungen für den Wissenserwerb (Renkl, 2020, S. 10).

Die dritte Form der kognitiven Belastung, der *germane cognitive load* (GCL), kann in gewisser Weise als eine Synthese zwischen ICL und ECL betrachtet werden (Paas & Sweller, 2021). Er steht nämlich für die kognitiven Ressourcen, die für die produktive Verarbeitung des Lerninhalts, also den ICL und nicht den ECL, zur Verfügung stehen. Je höher also der Anteil der intrinsischen kognitiven Belastung im Vergleich zur extrinsischen während des Wissenserwerbs ist, desto höher ist der GCL (Paas & Sweller, 2021, S. 79).

Um Lernen in Hinblick auf eine bestmögliche Nutzung der zur Verfügung stehenden kognitiven Ressourcen zu optimieren, zielen die meisten im Rahmen der CLT entwickelten Methoden auf eine Reduzierung des ECL ab (ebd.). Das hat zum Ziel, bestimmten Effekten entgegenzuwirken, die insbesondere bei multimedialen Materialien auftreten: zum Beispiel dem Split-Attention-Effekt, dem Modalitätseffekt, oder Effekten der räumlichen und zeitlichen Kontiguität (Horz, 2020, S. 145; Paas & Sweller, 2021, S. 79) (s. auch Tabelle 1).

2.3 Überzeugungskraft

Wie in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben, beeinflussen individuelle Vorstellungen und Konzepte, die Personen zu einer Lernsituation mitbringen, ihren Lernprozess maßgeblich. Insbesondere wenn Inhalte gelernt werden sollen, die sich mit gängigen Vorstellungen und Erwartungen aus dem Alltag widersprechen und die fachlich richtige Erklärung somit nicht intuitiv ist, können Schwierigkeiten auftreten. Schließlich müssen unter Umständen die bisher vorherrschenden persönlichen Vorstellungen angepasst oder verändert werden.

Gerade für solche Fälle ist die Frage naheliegend, welche Faktoren dafür verantwortlich sind, dass ein Lerngegenstand als überzeugend wahrgenommen wird. Diese Frage ist in der Physikdidaktik besonders für solche Themengebiete relevant, in denen Lernende häufig fachlich unpassende Konzepte aufweisen. Um zu dem erwünschten Lernziel zu gelangen, müssen sie mit einer neuen Sichtweise in Kontakt kommen und diese annehmen und akzeptieren - von ihr also überzeugt werden.

In der Kommunikationswissenschaft wird die Operationalisierung der Überzeugungskraft auf genau diese Weise vorgenommen: Wenn Rezipienten von Informationen diese akzeptieren, kann die Information oder Botschaft („message“) überzeugend („persuasive“) genannt werden (s. z. B. Rieh & Danielson, 2007, S. 314).

2.3.1 Definition und begriffliche Trennung

Eine intensive Auseinandersetzung mit dem Konstrukt der Überzeugungskraft („persuasion“) begann in der experimentellen Sozialpsychologie nach der Zeit des zweiten Weltkriegs (Flanagin & Metzger, 2008, S. 7; Petty & Cacioppo, 2018, S. 6; Petty, Rucker, Bizer & Cacioppo, 2004, S. 65). Der Ursprung dieser Forschung kann jedoch noch deutlich früher verortet werden: Bereits in der Antike beschäftigte sich Aristoteles mit den Bedingungen, die dafür verantwortlich sind, dass ein Publikum durch gesprochene Rhetorik von einem Standpunkt überzeugt werden kann. Er formulierte die Theorie, dass dafür drei Aspekte zu beachten sind: die Quelle (*ethos*), der Inhalt der Nachricht (*logos*) und die Emotionen des Publikums (*pathos*) (Aristoteles, 1954, zitiert nach Petty et al., 2004, S. 65). Laut Aristoteles hatte also eine angesehene Person eine höhere Wahrscheinlichkeit, ihr Publikum von ihrem Standpunkt zu überzeugen, als wenn die gleiche Information von einer weniger geachteten Quelle stammte (Petty et al., 2004, S. 6).

Von dieser Theorie ausgehend, wurden in der jüngeren Forschung weitere Variablen betrachtet, die die Überzeugungskraft beeinflussen. Eine solche Variable ist die Glaubwürdigkeit („credibility“) zum Beispiel der Informationsquelle oder der Nachricht, die übermittelt wird. Anders als in den Informationswissenschaften, wird in der sozialpsychologischen und kommunikationswissenschaftlichen Forschung die Glaubwürdigkeit typischerweise nicht als eine Variable betrachtet, die der Quelle oder der Nachricht inhärent ist. Stattdessen ist sie Teil der subjektiven Wahrnehmung und liegt deshalb bei der Person, die am empfangenden Ende der Kommunikation steht (Flanagin & Metzger, 2008, S. 8). Glaubwürdigkeit ist in diesem Sinne also

eine Eigenschaft, die Menschen, Organisationen oder deren kommunikativen Produkten (mündliche oder schriftliche Texte, audiovisuelle Darstellungen) von jemandem (Rezipienten) in Bezug auf etwas (Ereignisse, Sachverhalte etc.) zugeschrieben wird. Eine Person oder Organisation ist dann glaubwürdig,

wenn man darauf vertrauen kann, dass deren Aussagen richtig sind. (Bentele, Brosius & Jarren, 2013, S. 109)

Aus diesem Grund kann die Glaubwürdigkeit auch nicht auf direktem Wege beobachtet werden und muss über indirekte Verfahren erhoben werden. Sie ist allerdings ein beeinflussender Faktor der Überzeugungskraft, welche wiederum durch die Akzeptanz der Botschaft operationalisiert werden kann (Rieh & Danielson, 2007, S. 314).

Frühe Forschung zur Überzeugungskraft ging davon aus, dass Variablen, die sie beeinflussen, jeweils einen einzigen und einheitlichen Effekt auf sie ausüben. Von jeder Variable wurde erwartet, dass sie sich auf die Überzeugungskraft entweder positiv oder negativ auswirkt (Petty et al., 2004, S. 65). Außerdem wurde davon ausgegangen, dass es einen einzelnen Prozess gibt, der für den jeweiligen Effekt verantwortlich ist, beispielsweise dass die Glaubwürdigkeit einer Quelle die Überzeugungskraft dadurch verstärkt, dass durch sie der Inhalt der Nachricht gründlicher verarbeitet wird (ebd., S. 65f).

Dass es einen komplexeren Zusammenhang zwischen der Überzeugungskraft und den Variablen, die sie beeinflussen, existiert, haben zahlreiche spätere Forschungsergebnisse gezeigt. Zum Beispiel geht eine höhere Anzahl an Argumenten nicht zwingend mit einer höheren Überzeugungskraft einher (Norman, 1976, zitiert nach Petty et al., 2004, S. 66) und die hohe Glaubwürdigkeit einer Quelle kann unter Umständen auch zu einer verringerten Überzeugungskraft führen (Sternthal, Dholakia, & Leavitt, 1978, zitiert nach Petty et al., 2004, S. 66).

Diese und weitere widersprüchliche Forschungsergebnisse führten dazu, dass sich das Gebiet der Einstellungsforschung in den siebziger Jahren in einem unübersichtlichen und verwirrenden Zustand befand (Himmelfarb & Eagly, 1974, zitiert nach Petty et al., 2004, S. 66), auf dessen Antwort das *Elaboration Likelihood Model of Persuasion* (ELM) (Petty & Cacioppo, 2018) Abhilfe schaffen sollte.

2.3.2 Das Elaboration Likelihood Model of Persuasion

Das ELM ist eine Theorie, die die Prozesse betrachtet, die für den Wechsel von Einstellungen verantwortlich sind. Außerdem werden die Variablen, die diese Prozesse hervorrufen, und die Stabilität der Urteile, die daraus resultierend gefällt werden, mitberücksichtigt (Petty et al., 2004, S. 67).

2 Lerntheoretische Grundlagen

Anders als die Theorien, die dem ELM in der experimentellen Forschung vorausgingen, handelt es sich nun um ein Modell, das bei der Beschreibung der Variablen und Prozesse, die zu einer Einstellungsänderung führen und somit für eine höhere Überzeugungskraft sorgen, mehr Flexibilität aufweist. Das ELM geht davon aus, dass die Variablen je nach Rolle, die sie in bestimmten Situationen einnehmen, die Überzeugungskraft unterschiedlich beeinflussen und dies auch auf unterschiedlichen Wegen tun können (ebd.).

Im Kern werden dabei zwei Routen beschrieben, die eine Person in einer Situation persuasiver Kommunikation auf dem sogenannten Elaborationskontinuum durchlaufen kann: Die zentrale Route und die periphere Route. Besitzt die Person eine hohe Motivation und die Fähigkeit, alle relevanten Informationen zu verarbeiten, dann werden zentrale Prozesse aktiviert und die Informationsquelle, der Inhalt der Nachricht und persönliche Faktoren (wie zum Beispiel Emotionen), kognitiv eingehend untersucht. Fehlt der Person jedoch die Motivation (zum Beispiel aufgrund von fehlender persönlicher Relevanz) oder die Fähigkeit, die Informationen zu verarbeiten, wird behindert (zum Beispiel durch zu große Ablenkung), dann wird im Elaborationsprozess eher die periphere Route durchlaufen (ebd.).

Dabei können auch periphere Prozesse zu einer Einstellungsänderung führen. Allerdings ist laut ELM davon auszugehen, dass Einstellungsänderungen, die aufgrund von Prozessen der zentralen Route entstehen, nachhaltiger und resistenter gegenüber Veränderungen sind (Petty, Haugtvedt, & Smith, 1995, zitiert nach Petty et al., 2004, S. 67).

Wie in Abbildung 2 zu erkennen ist, sind in einer Situation der persuasiven Kommunikation verschiedene Faktoren dafür verantwortlich, dass die Nachricht über die zentrale oder die periphere Route verarbeitet wird. Auf der linken Seite sind dabei die Faktoren zu sehen, die vornehmlich für eine Verarbeitung über die zentrale Route verantwortlich sind: die motivationsregelnden Faktoren persönliche Relevanz des Inhaltes und Kognitionsbedürfnis, zum Beispiel. Mit Kognitionsbedürfnis ist ein motivationales Merkmal gemeint, und zwar „an individual's tendency to engage in and enjoy effortful cognitive endeavors“ (Cacioppo, Petty & Kao, 1984, S. 306, zitiert nach Ludwig, 2017, S. 33). Hinzu kommt das Vorwissen der Person aber auch Eigenschaften der Nachricht, wie deren Schwierigkeit und Verständlichkeit.

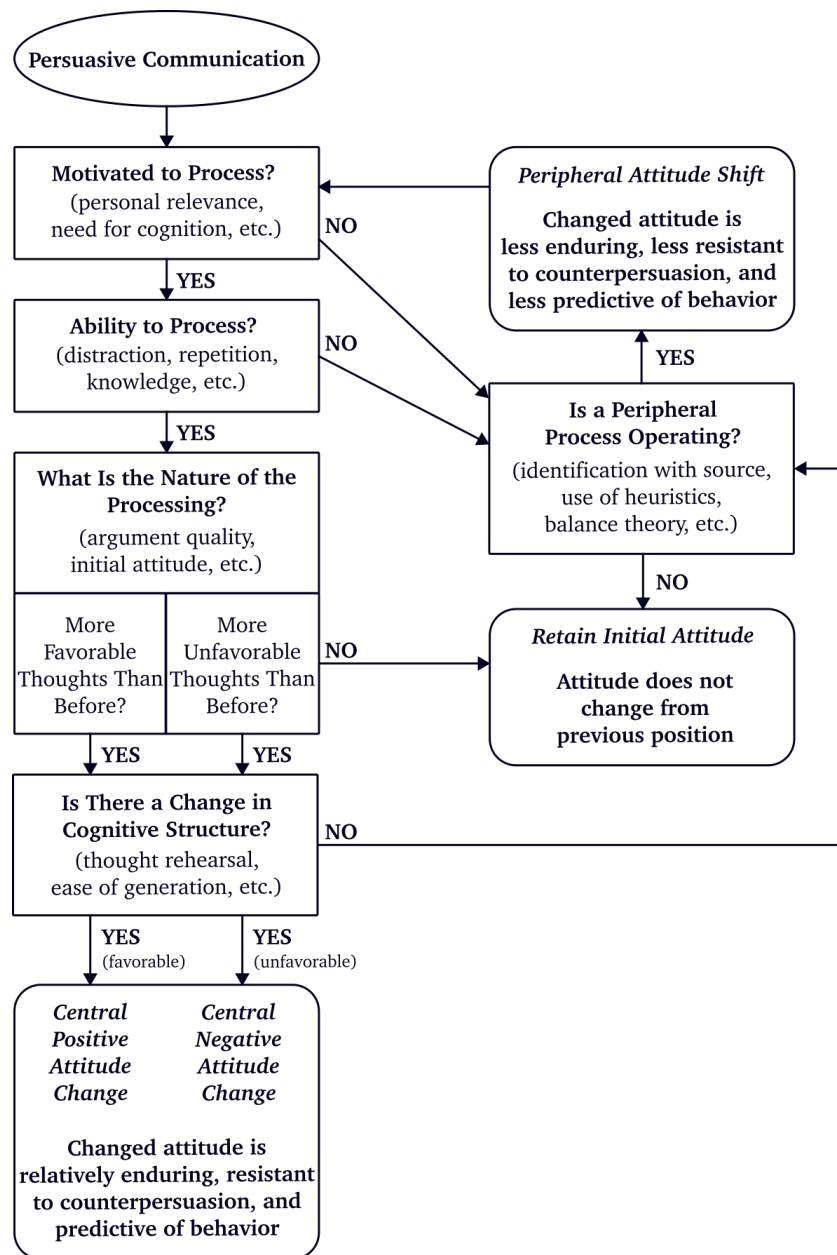


Abbildung 2: Modellhafte Darstellung des ELM of Persuasion nach Petty, Rucker, Bizer, & Cacioppo, 2004, original erschienen in Petty & Cacioppo, 1986

Die rechte Seite des Diagramms beinhaltet Faktoren, die den sogenannten „peripheral cues“ angehören: beispielsweise die Sympathie und Glaubwürdigkeit der Quelle, oder die reine Anzahl der Argumente. Diesen peripheren Hinweisen wird vor allem dann Bedeutung geschenkt, wenn die personalen Faktoren der zentralen Route nicht hoch sind, was wiederum mit einer weniger gründlichen kognitiven Verarbeitung der Argumente einhergeht (Petty et al., 2004).

2 Lerntheoretische Grundlagen

Obwohl das ELM aus dem Kontext persuasiver Kommunikation stammt und vor allem für die Beschreibung von Prozessen der Einstellungsänderungen in der Marktforschung genutzt wird, können grundlegende Annahmen daraus auch für Modelle außerhalb dieses Fachgebiets Anwendung finden (Petty & Wegener, 1999, S. 64).

Dass auch naturwissenschaftlicher Unterricht unter dem Aspekt einer persuasiven Situation betrachtet und gestaltet werden kann, zeigt unter anderem die Arbeit von Alexander, Fives, Buehl & Mulhern (2002). Sie haben die Effekte eines auf diese Weise ausgestalteten Unterrichts auf Wissen, Interesse und Überzeugungen („beliefs“) von Schüler*innen der sechsten und siebten Jahrgangsstufe untersucht. Die Ergebnisse zeigen im Pre-Post-Vergleich eine stärkere Entwicklung dieser Variablen im Vergleich zu klassischem Unterricht, wobei die Autorinnen auch auf die begrenzte Übertragbarkeit auf andere Szenarien hinweisen, aufgrund von forschungsdesignbedingten Limitationen (ebd., S. 810f).

Eine ähnliche Beschreibung von Unterricht als Überzeugungssituation findet sich auch in den Arbeiten von Murphy (2001) und Chinn & Samarapungavan (2001). Dabei wird betont, dass mit Persuasion in diesem Kontext keine manipulative Praxis gemeint ist und sie auch in Situationen des regulären Curriculums angewandt werden kann und zwar nicht nur bei kontroversen Themen (Murphy, 2001, S. 226). Außerdem wird darauf verwiesen, dass es doch viele Themen gibt, bei denen anzunehmen ist, dass Schüler*innen, auch wenn sie wissenschaftliche Konzepte aufbauen, diese nicht gezwungenermaßen im Sinne einer persönlichen Überzeugung annehmen (Chinn & Samarapungavan, 2001). Chinn & Samarapungavan empfehlen deshalb, Unterricht nicht nur als den Rahmen der Wissensvermittlung anzusehen, sondern eben auch als Überzeugungssituation (ebd.).

Eine direkte Übertragung des ELM auf einen naturwissenschaftsdidaktischen Kontext wurde durch Ludwig (2017) vorgenommen. Dabei wurden verschiedene Argumentkategorien betrachtet, die von Schüler*innen für die Begründung einer Hypothesenauswahl genutzt werden, wenn sie mit Experimenten konfrontiert werden, die unerwartete Ergebnisse liefern. In diesem Sinne wurde eine Überzeugungssituation hergestellt, in der über das ELM Aussagen über die erwartete Nachhaltigkeit der Einstellungsänderungen der Schüler*innen getroffen werden können (ebd., S. 31ff).

Dafür werden die Argumentkategorien inhaltlich den zwei Routen zugeordnet, die laut ELM beim Elaborationsprozess durchlaufen werden. Analog zu der Theorie des ELM, werden dabei jene Kategorien, die für eine rationale Auseinandersetzung mit dem Experiment sprechen der zentralen Route zugeordnet, während die periphere Route Argumentkategorien mit affektivem und weniger rationalem Inhalt umfasst (Ludwig, 2017, S. 35f).

Die Argumentkategorien *Daten als Evidenz* und *Messunsicherheiten (explizit)* zum Beispiel gehören der zentralen Route an, da sie sich auf direkte Weise auf die im Experiment gewonnenen Daten beziehen und damit eine explizite kognitive Verarbeitung der persuasiven Nachricht, in diesem Fall des Experiments, voraussetzen. Die Argumentkategorie *Intuition* hingegen, deutet auf eine Informationsverarbeitung entlang der peripheren Route hin, da sie die affektiven, intuitiven Begründungen für die Informationsverarbeitung beinhaltet (ebd.).

In einigen zentralen Aspekten konnte die von Ludwig (ebd.) durchgeführte Erhebung die Übertragbarkeit des ELM auf das Argumentieren beim naturwissenschaftlichen Experimentieren zeigen. Besonders hervorzuheben ist dabei die Auswirkung des Fachwissens auf die Argumentkategorien *Daten als Evidenz* und *Intuition*. Wie durch die theoretischen Überlegungen des ELM zu erwarten war, wirkt sich das Fachwissen, das beim Experimentieren der im ELM formulierten Fähigkeit zur Verarbeitung der persuasiven Nachricht gleichgesetzt wurde, positiv auf die Verwendung der Argumentkategorie *Daten als Evidenz* und negativ auf die Verwendung der Argumentkategorie *Intuition* aus (ebd., S. 124). Das entspricht den theoretischen Annahmen des ELM, sagt es doch aus, dass wenn die Fähigkeit zur Verarbeitung der Information vorhanden ist, dies auch auf kognitiv umfangreiche Art getan wird (hier sichtbar durch die Verwendung der Kategorie *Daten als Evidenz*) und Prozesse, die der peripheren Route zugeordnet sind (hier die Auswahl der Kategorie *Intuition*), weniger in Anspruch genommen werden (ebd., S. 124f).

Außerdem zeigen die Ergebnisse des Follow-Up Tests einen negativen Zusammenhang zwischen Lernzuwachs und der Verwendung der Argumentkategorie *Intuition*. Dies, zusammen mit dem negativen Zusammenhang zwischen den Kategorien *Daten als Evidenz* und *Intuition*, stehen im Einklang mit der Annahme des ELM, dass Einstellungsänderungen, die aufgrund von Verarbeitungsprozessen entlang der zentralen Route vollzogen wurden, nachhaltiger sind als die der peripheren Route (ebd., S. 132).

2 Lerntheoretische Grundlagen

Die eben beschriebene Übertragung des ELM auf das Experimentieren im naturwissenschaftlichen Unterricht ist für die vorliegende Arbeit von besonderem Interesse, da es einen differenzierten Blick auf die Überzeugungskraft von Experimenten erlaubt. Werden neben der Überzeugungskraft, operationalisiert durch die Akzeptanz der durch die Experimente übermittelten Botschaft, auch die Argumentkategorien erhoben, die für eben diese Akzeptanz verwendet werden (zum Beispiel *Daten als Evidenz* oder *Intuition*), so kann eingeschätzt werden, inwiefern erwartbar ist, dass das jeweilige Experiment zu einer langfristigen Einstellungsänderung beiträgt.

3 Das Teilchenmodell der Materie

3.1 Fachliche Betrachtung

Die Erkenntnis, dass Materie nicht als kontinuierliches Ganzes besteht, sondern aus diskreten Teilchen aufgebaut ist, kann als fundamentales physikalisches Konzept beschrieben werden. Richard Feynman hob die Bedeutsamkeit dieser Erkenntnis folgendermaßen hervor:

If, in some cataclysm, all of scientific knowledge were to be destroyed, and only one sentence passed on to the next generations of creatures, what statement would contain the most information in the fewest words? I believe it is the *atomic hypothesis* (or the *atomic fact*, or whatever you wish to call it) that *all things are made of atoms – little particles that move around in perpetual motion, attracting each other when they are a little distance apart, but repelling upon being squeezed into one another*. In that one sentence, you will see, there is an *enormous* amount of information about the world, if just a little imagination and thinking are applied. (Feynman & Davies, 2011, S. 4)

Der hier benannte Atomismus hat seinen Ursprung in der Antike (Falkenburg, 1993), auch wenn die hier genutzten Beschreibungen von Teilcheneigenschaften erst deutlich später formuliert wurden. Die Naturphilosophie des 17. Und 18. Jahrhunderts brachten erste physikalische Präzisierungen des Teilchenbegriffes im Rahmen der klassischen Punktmechanik hervor, die Teilchen als punktförmige, geladene Korpuskeln definiert, die dem Trägheits- und Kraftgesetz von Newton unterliegen (ebd.).

Damit wurde die Zusammensetzung der Materie durch die Dynamik eines Teilchen-Systems beschrieben, die es auch zulässt, die einzelnen Systembestandteile sowie die Wechselwirkungen innerhalb des Systems zu betrachten (ebd.). In der Teilchen- und Atomphysik fand dieses Teilchenkonzept vielfältige Anwendung, zum Beispiel in der klassischen Elektronentheorie von Lorentz 1895, in der Messung der elektrischen Elementarladung e im Verhältnis zur zugehörigen Masse m an Kathodenstrahlen von Thomson 1897, in der Beobachtung von einzelnen Szintillationen von α -Strahlen an einem Zinksulfid-Schirm von Crookes 1903 oder in den Streuexperimenten von Rutherford ab 1906,

3 Das Teilchenmodell der Materie

die Marsden zur Entdeckung der Rückwärtsstreuung von α -Strahlen an Goldfolie führten und damit die Grundlage für Rutherford's klassisches Atommodell und seine Streuformel bildeten (ebd.). Ebenso können die Experimente mit der Öltröpfchen-Methode von Millikan zwischen 1909 und 1911 genannt werden, bei der Messungen zur Bestimmung der Elementarladung e an einzelnen Ladungsträgern durchgeführt wurden, und die Experimente von Wilson 1912, die fotografierte Teilchenspuren von α - und β -Strahlen als Ergebnis hatten (ebd.).

Auch wenn das klassische Teilchenkonzept für weitere Anwendungen genutzt werden konnte, veränderte die Quantentheorie doch grundlegend, was unter "Teilchen" zu verstehen ist. Zwar werden Quantenobjekte, die Referenzobjekte der Quantentheorie, auch als Teilchen bezeichnet, was genau daran jedoch "teilchenhaft" ist, ist schwer festzulegen. Zwar können wie bei klassischen Teilchen auch einem Quantenobjekt Masse und Ladung als hauptsächliche Eigenschaften zugeschrieben werden, die Träger dieser Eigenschaften verlieren jedoch in der nichtrelativistischen Quantenmechanik aufgrund der Unschärferelation ihre Individuationskriterien und sind damit nicht mehr als immer in Raum und Zeit vorhandene einzelne Entitäten konzipierbar (ebd.).

Dieser Widerspruch, dass einerseits auch in der Quantentheorie von einzelnen Objekten gesprochen wird, diese Objekte sich jedoch auf solch grundlegende Art andersartig verhalten, dass man wieder in Frage stellen kann, ob die Bezeichnung "Teilchen" angemessen ist, macht deutlich, wie herausfordernd die Diskussion über den Aufbau der Materie sein kann, vor allem wenn man vergleichsweise einfache und nachvollziehbare Beschreibungen dafür verwenden möchte.

Selbst wenn man nicht auf die weiter oben genannten Beispiele fortgeschrittener experimenteller Methoden der Teilchenphysik eingeht, sondern das im Vergleich frühe Atommodell des Chemikers Dalton betrachtet sowie die kinetische Gastheorie, die auf den Forschungen von Chemikern wie Boyle, Gay-Lussac, Avogadro, Lavoisier, Proust und Dalton basieren (Harrison & Treagust, 2006), ist eine Andersartigkeit der Teilchenwelt im Vergleich zur wahrnehmbaren Realität erkennbar.

Das Atommodell nach Dalton kann im Wesentlichen mit folgenden fünf Aussagen zusammengefasst werden:

- "Matter consists of tiny indestructible particles called atoms.

- All atoms of a given element are identical, and have the same mass.
- Atoms of different elements have different masses.
- The mass of an atom of an element is the same in all of its compounds.
- Particles join together in simple consistent ratios when two different substances react to form a third substance. Mass is conserved in all of these reactions.” (Bucat, 1983, S. 34, zitiert nach Harrison & Treagust, 2006, S. 56)

Während die wichtigsten Aussagen der kinetischen Gastheorie folgende Punkte umfassen:

- “A gas is composed of invisible particles with empty space between the particles.
- Gas particles are evenly scattered in any enclosed space.
- Gas particles are constantly in motion and particle collisions are perfectly elastic.
- Particles move slower in liquids and vibrate about fixed positions in solids.
- Gas particles are widely spaced and there are smaller but similar sized spaces between particles in solids and in liquids.” (de Vos & Verdonk, 1996, S. 658 und Garnett, 1984, S. 153, zitiert nach Harrison & Treagust, 2006, S. 56)

Diese zwei Modelle sind für die vorliegende Arbeit vor allem deshalb interessant, da sie, zumindest in Teilen, häufig Gegenstand des Unterrichts der Sekundarstufe I sind. Auch wenn sie für detaillierte Beschreibungen vieler physikalischer und chemischer Vorgänge unzureichend sind, bietet ein Blick auf den historischen Kontext um deren Entstehung ein Verständnis dafür, dass Wissenschaft als ein Prozess des Problemlösens beschrieben werden sollte und nicht als eine Suche nach der absoluten Wahrheit (Harrison & Treagust, 2006). Schließlich war dieser Kontext nicht von zufälligen Entdeckungen aufgrund willkürlich durchgeführter Experimente geprägt, sondern von gründlich durchdachten Theorien, begründeten Vorhersagen und wissenschaftlichem Austausch (ebd.).

Dementsprechend ist für die Entwicklung von Theorien in der Wissenschaft das Prinzip bedeutsam, eine Maximalanzahl an Erklärungen und Vorhersagen hervorbringen zu können, die auf einer Minimalanzahl an Annahmen basieren (de Vos & Verdonk, 1996). Genau dieses Prinzip liegt jedoch an der Quelle der Schwierig-

3 Das Teilchenmodell der Materie

rigkeiten, die Schüler*innen häufig mit dem Teilchenkonzept haben, wie de Vos & Verdonk (ebd.) verdeutlichen:

A scientific explanation starts, as it were, from nothing and assumes only what is necessary. The child, on the other hand, starts from the full world of everyday life and, in a slow and difficult struggle, learns to delete aspects such as temperature and color, to arrive at the same point from the opposite direction. As a result, the child's criteria for simplicity and complexity are exactly reversed. Minima naturalia² are, scientifically speaking, unnecessarily complicated, but seen through the eyes of a child they are reassuringly simple. (de Vos & Verdonk, 1996, S. 663)

3.2 Das Teilchenmodell im naturwissenschaftlichen Unterricht

In den Bildungsstandards der Kultusministerkonferenz vorgegeben und in den Kerncurricula der Länder konkreter ausgearbeitet, findet sich im Fach Physik das Thema Materie als eines der vier Basiskonzepte wieder (KMK, 2005). Bereits in der Sekundarstufe I ist demnach eine explizite Einführung des Teilchenmodells vorgesehen, mit besonderem Fokus auf die auch im Alltag erfahrbaren Phänomene, die sich gut anhand des Teilchenmodells erklären lassen: Aggregatzustandsänderungen von Stoffen und deren Verhalten bei Temperaturänderungen, Klima- und Wetterphänomene, sowie das Verhalten von Flüssigkeiten und Gasen unter Druck (z. B. Hessisches Kultusministerium, 2011).

Zusätzlich zu der Funktion, einige physikalische Phänomene erklären zu können, kann jedoch argumentiert werden, dass die viel bedeutendere Legitimation für die explizite Behandlung des Teilchencharakters von Materie im Physikunterricht seine historische Relevanz als naturwissenschaftliche Erkenntnis ist (Fischler & Reiners, 2006, S. 17). Außerdem bietet das Teilchenmodell eine gute Möglichkeit, dem Anspruch von Physikunterricht gerecht zu werden, Schüler*innen nicht nur fachliche Inhalte zu vermitteln, sondern auch mit physikalischen Arbeitsweisen,

² Minima Naturalia bezeichnet die Entitäten einer Teilchentheorie, die im Europa des 14. Jahrhunderts weit verbreitet war. Ihnen wurden die Eigenschaften der Stoffe zugeschrieben, die sie ausmachten, mit dem einzigen Unterschied, dass sie als unteilbar galten. Ein Wasser-Minimum Naturale, beispielsweise, wäre ein sehr kleiner, nicht weiter zerteilbarer Tropfen Wasser (de Vos & Verdonk, 1996).

in diesem Fall der Arbeit mit Modellen, vertraut zu machen (Mikelskis-Seifert, 2006), ein Ziel, das sich auch in den Bildungsstandards wiederfindet (KMK, 2005).

In diesem Ansatz des „Lernens über Modelle“, wie ihn Mikelskis-Seifert beschreibt (2006), werden Modelle folgendermaßen definiert: „Ein Modell ist ein Gegenstand oder theoretisches Konstrukt, welches von einem Subjekt für einen bestimmten Zweck geschaffen bzw. verwendet wird. Dabei bestehen zwischen bestimmten Entitäten des Modells und bestimmten Entitäten des präsentierten Objektes Analogien.“ (ebd. S. 174). Objekt, Subjekt und Modell stehen also in einer Beziehung zueinander (s. Abbildung 3).

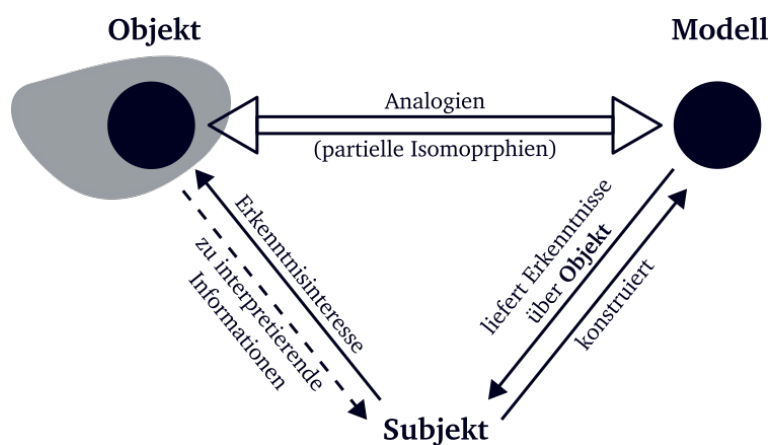


Abbildung 3: Erkenntnisgewinnung mithilfe von Modellen nach Mikelskis-Seifert (2006)

Das Subjekt interpretiert die Informationen und Daten, die es durch die Beobachtung des Objekts erhält, indem ein Modell konstruiert wird. Nun kann es durch die Analogie, die zwischen dem Objekt und dem konstruierten Modell besteht, neue Erkenntnisse über das Objekt gewinnen (ebd., S. 173). Die Analogie wird dabei als partiell isomorphe Abbildung verstanden, da einerseits das Objekt Eigenschaften besitzt, die das Modell nicht hat, und andererseits das Modell durch Eigenschaften beschrieben wird, die das Objekt nicht besitzt (ebd.). Mit dieser Beschreibung des Modellbegriffs lehnt sich Mikelskis-Seifert an den von Kircher (1995, zitiert nach Mikelskis-Seifert, 2006, S. 174), welcher sich wiederum auf Stachowiak (1973, zitiert nach Mikelskis-Seifert, 2006, S. 174) bezieht.

Aus didaktischer Sicht können die auf diese Weise definierten Modelle je nach Zielsetzung und Anwendungsbereich unterschiedlich klassifiziert werden. Kircher zum Beispiel (1995, zitiert nach Mikelskis-Seifert, 2006) unterscheidet für den

3 Das Teilchenmodell der Materie

Physikunterricht zum einen zwischen gegenständlichen und theoretischen Modellen, wobei die theoretischen Modelle Hypothesen, Theorien, Erklärungen, Voraussetzungen, sowie fiktive und vorläufige Vorstellungen miteinschließen (Mikelskis-Seifert, 2006). Außerdem wird je nach Ziel, mit dem das jeweilige Modell erstellt wird, unterschieden (s. Abbildung 4).

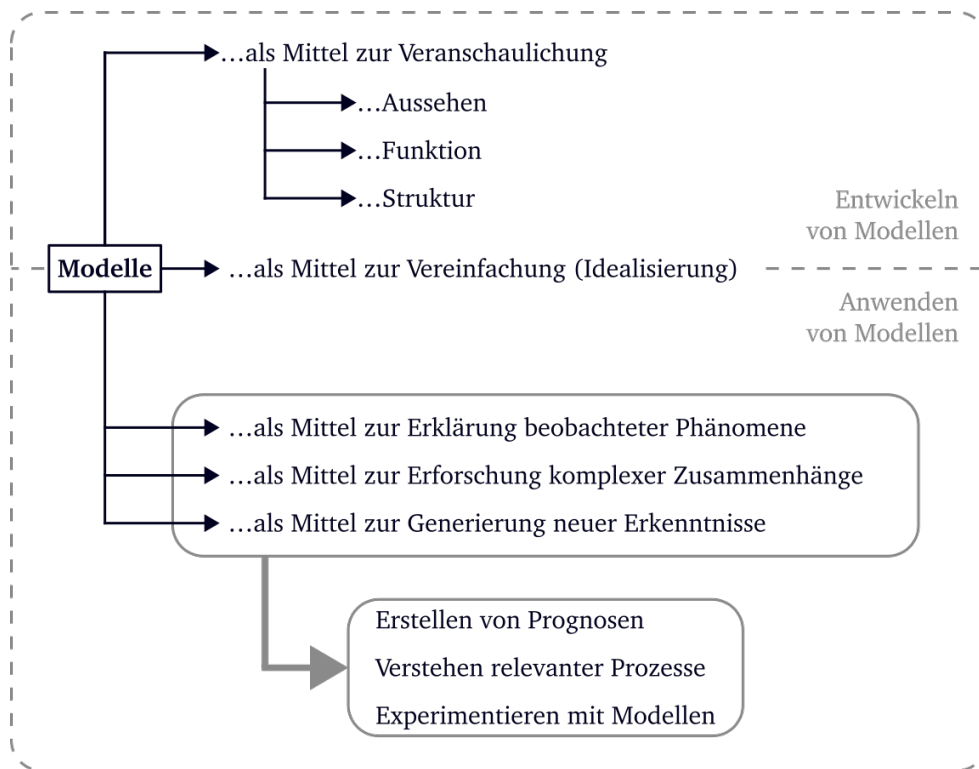


Abbildung 4: Klassifikation von Modellen, angepasst nach Mikelskis-Seifert (2006)

Zum einen kann ein Modell mit dem Ziel eingesetzt werden, den Sachinhalt zu vereinfachen (Idealisierung). Ein Beispiel dafür wäre das Lichtstrahlmodell, das für die Erklärung der Lichtausbreitung verwendet wird (ebd., S. 175). Zum anderen können Modelle für die Veranschaulichung eines Körpers (zum Beispiel, wenn er besonders groß oder klein ist), oder von Strukturen oder Funktionen eines Systems verwendet werden (ebd.). Letzteres hat den Vorteil, dass Zusammenhänge und Strukturen nahbar gemacht werden können, die sonst zu komplex zum direkten Erfassen oder nicht direkt wahrnehmbar sind (ebd.).

Eine dritte Unterscheidung bezieht sich auf die Anwendungsbereiche von Modellen. Sie können „als Mittel zur Erklärung beobachteter Phänomene, zur Erforschung komplexer Zusammenhänge sowie zur Generierung neuer Erkenntnisse

eingesetzt werden“ (ebd., S. 176). Egal welche dieser drei Anwendungen stattfinden, es gehören stets auch das Erstellen von Prognosen und das Verstehen relevanter Prozesse dazu (s. Abbildung 4). Auch Teilchenmodelle können also sowohl für Erklärungen als auch für Prognosen verwendet werden (ebd.).

Dass Modelle in einer ausführlichen Beschreibung des Erkenntnisgewinnungsprozesses im Physikunterricht eine bedeutende Rolle spielen, wird auch in dem Kreislauf der Erkenntnisgewinnung von Teichrew (2023a) deutlich. Dieser stellt eine „Synthese bisheriger wissenschaftstheoretischer Darstellungen zum Modellbegriff, zum Modellierungsprozess und zum Experimentieren“ dar (ebd., S. 54f) und ist als Strukturhilfe für Lernumgebungen gedacht, „die Modelle und Experimente in einem gemeinsamen Problemlöseprozess anbieten“ (ebd., S. 54). Aus genau diesem Grund ist er auch für diese Arbeit relevant – es wird darin nicht nur das Arbeiten mit Modellen, sondern auch das Experimentieren gleichermaßen mit einbezogen (s. Abbildung 5).

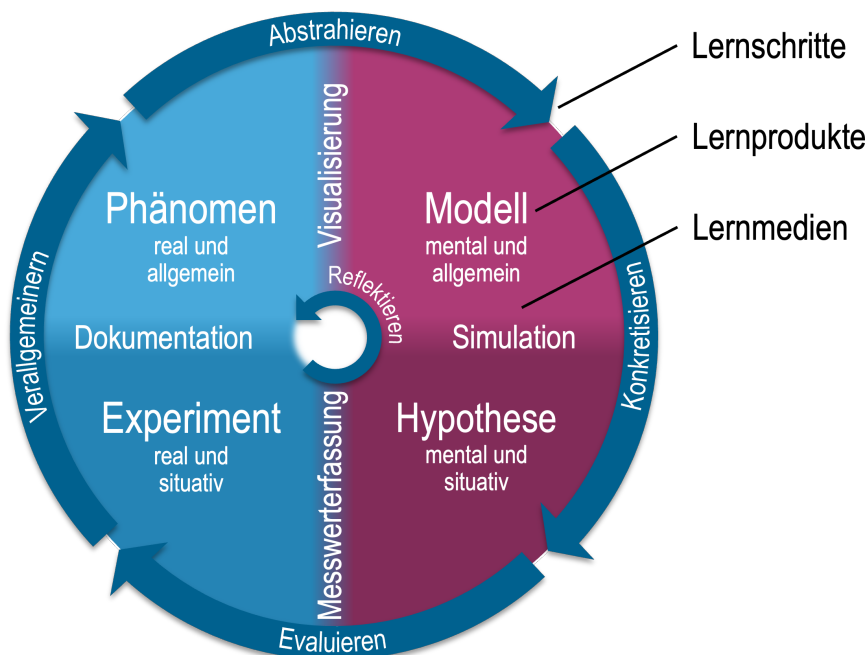


Abbildung 5: Kreislauf der Erkenntnisgewinnung nach Teichrew (2023a)

Wie hier zu sehen ist, stehen Phänomen, Modell, Hypothese und Experiment als wesentliche Unterrichtsgegenstände und sogenannte Lernprodukte im Mittelpunkt. Als Lernschritte werden die Übergänge zwischen den Lernprodukten genannt, die sich aus den verschiedenen Eigenschaften dieser Produkte ergeben:

3 Das Teilchenmodell der Materie

oben befinden sich die Unterrichtsgegenstände mit allgemeinem Charakter, während unten situative Lernprodukte stehen. Auf der linken Seite befinden sich Elemente, die in der Realität verankert sind, während die rechte Seite mentale Schlussfolgerungen und abstrakte Strukturen beinhaltet (Teichrew, 2023a, S. 55).

Im besten Fall durchlaufen die Lernenden alle vier Lernschritte. Das erfordert dann die jeweiligen kognitiven Fähigkeiten, hat aber als Resultat, dass sie nicht nur dem naturwissenschaftlichen Erkenntnisgewinnungsprozess gerecht werden, sondern auch die Relevanz der einzelnen Bereiche erkennen und die dazugehörigen Modell- und Experimentierkompetenz ausbauen (ebd., S. 57f).

So wie im Kreislauf der Erkenntnisgewinnung durch den inneren Pfeil deutlich gemacht wird (s. Abbildung 5) gehört zu diesem Prozess auch das Reflektieren der einzelnen Schritte in rückläufiger Richtung. Dadurch soll das Verständnis über die Natur der Naturwissenschaften (Metawissen) gefördert werden (ebd., S. 59), was bezogen auf das Teilchenmodell der Materie an den Vorschlag von Mikelskis-Seifert erinnert (2006). Das Ziel dabei ist, den Modellierungsprozess und die Eigenschaften der Modelle, die jeweils genutzt werden, explizit zu machen, damit die Lernenden ein Metakzept aufbauen können, sie also „über die Modelle als solche explizit reflektiert haben und insbesondere in der Lage [...] sind, Fachwissen und Alltagswissen aufeinander zu beziehen“ (Peuckert, 2006, S. 78). Mikelskis-Seifert (2006) schlägt dafür vor, das Lernen mit und über Modelle im Schulunterricht über die Jahrgangsstufen hinweg und bestenfalls mit den anderen naturwissenschaftlichen Fächern vernetzt durchzuführen.

Eine besondere Schwierigkeit jedoch, die das Lehren des Teilchenmodells mit sich bringt, ist das sogenannte Visualisierungsdilemma (ebd., S. 177), denn „je stärker man durch immer bessere Veranschaulichungen beim Lernen helfen möchte, desto intensiver bezieht man sich auf die erfahrbare makroskopische Welt und setzt sich der Gefahr von Missverständnissen aus“ (Fischler, 1997, zitiert nach Mikelskis-Seifert, 2006, S. 177).

Dass anschauliche Modelle besonders einprägsam sein können und später zu Verständnisschwierigkeiten führen können, lässt sich gut am Beispiel des Bohr'schen Atommodells sehen. Empirische Untersuchungen zeigen, dass vor allem bei der späteren Thematisierung quantenphysikalischer Modelle die mechanistischen

Beschreibungen, die durch das Modell von Bohr vermittelt werden, äußerst resistent gegenüber Veränderung sind (Lichtfeldt, 1992).

Befürworter der Behandlung des Bohr'schen Modells in der Schule heben „die gute Gelegenheit für den Physikunterricht, die Ideengeschichte der Atomvorstellungen vom einfachen Korpuskelmodell über das Bohr'sche Modell bis zu den modernen Sichtweisen, die vor allem mit der Ablösung klassischer Prinzipien verbunden sind, im Unterricht als nachvollziehbaren Prozess zu behandeln“ hervor (Fischler & Schecker, 2018, S. 147). Auch dieser Standpunkt wird von empirischen Untersuchungsergebnissen unterstützt, wie zum Beispiel von McKagan, Perkins & Wieman (2008), die sich allerdings auf Physikstudierende beziehen.

Betrachtet man die Entwicklung der fachdidaktischen Forschung zum Teilchenkonzept der vergangenen Jahrzehnte, dann zeigt sich nicht nur um die Diskussion zur Behandlung des Bohr'schen Atommodells eine umstrittene Sachlage. Seit den 80er-Jahren war im Zentrum der Diskussionen, ausgehend von dem Unterschied, das „Atom als ersten Aufbaustein“ im Unterricht einzuführen und nicht „als letztes Teilungsstück“ (Pfundt, 1981), inwiefern und an welcher Stelle die Andersartigkeit der Teilchen in Bezug auf makroskopische Stoffe und Phänomene thematisiert werden sollte (Rehm & Parchmann, 2009). Außerdem wurde beginnend mit den 90er-Jahren der fachlichen Angemessenheit des typischerweise in der Schule verwendeten Teilchenmodells Aufmerksamkeit geschenkt und ein Schwerpunkt auf die Erhebung von Schülervorstellungen zu dem Thema gelegt (ebd.). Diese zeigten auch über Jahre hinweg ein größtenteils unverändertes Bild: In vielen Fällen setzen sich die Teilchenvorstellungen von Schüler*innen aus Mischkonzepten zusammen, in denen sich sowohl Alltags- als auch Unterrichtsvorstellungen wiederfinden, sowie „sinnliche Eindrücke“ (ebd., S. 3), was sich konkret insbesondere als Kontinuumsvorstellungen und als auf Teilchen übertragene makroskopische Eigenschaften äußert (Harrison & Treagust, 2006). Während dieser Zeit und als Resultat der fachdidaktischen Diskussionen entwickelten sich verschiedene Ansätze, das Teilchenkonzept im Unterricht einzuführen und zu behandeln.

Um dem Visualisierungsdilemma (s. weiter oben) aus dem Weg zu gehen, wurden Vorschläge von Unterrichtskonzeptionen formuliert, die auf eine optische Darstellung des Teilchenmodells komplett verzichten (Buck, 1994, zitiert nach Mikelskis-Seifert, 2006). Da Verbildlichungen von Teilchen jedoch nicht nur im Schulunterricht, sondern auch im Alltag anzutreffen sind, kann auch dieser Ansatz nicht

3 Das Teilchenmodell der Materie

garantieren, dass Schüler*innen trotzdem makroskopische Eigenschaften, die in den Visualisierungen anzutreffen sind, in ihre Vorstellungen zum Teilchenmodell mit übernehmen.

Ein weiterer Ansatz, mit dem Visualisierungsdilemma umzugehen, ist der bewusste Einsatz von Darstellungsformen, die in ihrem Aussehen weit entfernt von typischen Vorstellungen von Teilchen sind. Damit sollen Teilchen also visuell dargestellt werden, gleichzeitig aber auch deren Andersartigkeit hervorgehoben und dadurch die Verwechslung von Realität und Modell ausgeschlossen werden. Ein Beispiel dafür ist die Verwendung von Herzen oder kleinen Männchen als Darstellung von Teilchen (s. Roer & Börner, 1993, zitiert nach Mikelskis-Seifert, 2006, S. 177). Diese Darstellungsformen bergen jedoch die Gefahr, bei Schüler*innen animistische Vorstellungen der Teilchen, insbesondere in Bezug auf deren Bewegung, hervorzurufen, die die Annahme schüren, Bewegung bedeute Leben (Fischler et al., 1998, S. 10).

Ein konzeptionell ähnlicher Vorschlag ist die typographische Darstellung von (elementaren) Teilchen, bei der Buchstaben anstelle von kugel- oder andersförmigen Symbolen verwendet werden (Wiener, Schmeling & Hopf, 2017). Dieser Vorschlag unterscheidet sich von den bisher vorgestellten dadurch, dass er eine detaillierte Beschreibung der subatomaren Bestandteile beinhaltet, die üblicherweise nur in den obersten Jahrgangsstufen des Physikunterrichts vorgenommen wird. Als Vorteile dieses Ansatzes heben die Autoren unter anderem eine gute Anknüpfbarkeit an komplexere Modelle der modernen Physik hervor (ebd.).

Andere Unterrichtskonzeptionen zielen darauf ab, bekannte Lernschwierigkeiten zu dem Thema gezielt anzusprechen und sie dadurch zu vermeiden, bzw. die Andersartigkeit der mikroskopischen Welt zu betonen (z. B. Buck, 1987; CLIS, 1987; Vollebregt et al., 1997; Vollebregt, 1998, zitiert nach Mikelskis-Seifert, 2006). Bei dem Vorschlag von Vollebregt (1998, zitiert nach Mikelskis-Seifert, 2006) wird auch das Teilchenmodell selbst schon früh explizit vorgegeben und nicht erst an beobachtbaren Phänomenen erarbeitet. Die Verfeinerung und Weiterentwicklung dieses anfangs einfachen Modells ist dann im Zentrum des Unterrichts, womit die Art und Funktion des Modells besser verstanden und makroskopische Eigenschaften weniger darauf übertragen werden sollen.

Diese Vielfalt an Lehr- und Lernansätzen zum Teilchenmodell zeigt, dass sich nicht „der eine“ richtige Weg bewährt hat, um Schüler*innen zu adäquaten Vorstellungen zum Aufbau der Materie zu führen. Da sich allerdings in den vergangenen Jahrzehnten internationaler Forschungsergebnisse vor allem die Erkenntnis zeigt, dass Schüler*innen häufig makroskopische Denkweisen auf die Mikrowelt übertragen (Peuckert, 2006), ist die Forderung naheliegend, bei der Vermittlung des Teilchenkonzepts auf die explizite Trennung dieser beiden Welten zu achten. Das wird auch in verschiedenen Lehransätzen deutlich, wie zum Beispiel in Rehm & Buck (2006), die eine explizite Betonung der „Andersweltlichkeit“ von Atomen in das Zentrum ihres Lehr-Lern-Arrangements stellen (S. 146), oder Mikelskis-Seifert (2006), die in ihrem Ansatz zwischen der „Erfahrungswelt“ und der „Modellwelt“ explizit unterscheidet (S.179).

3.2.1 Schülervorstellungen zum Aufbau der Materie

Für die Beschreibung typischer Schülervorstellungen zum Aufbau der Materie lohnt sich ein Blick in die Forschung der *Learning Progressions*, da sich diese an die empirisch erhobenen Schülervorstellungen zu verschiedenen Zeitpunkten der Schullaufbahn orientieren (s. Kapitel 2.1.3). Hadenfeldt et al. (2016) beschreiben für das Materiekonzept fünf Verständnisstufen, die typischerweise über die Schulzeit hinweg durchlaufen werden (CPRE, 2011; Hadenfeldt, Liu et al., 2014; Merritt & Krajcik, 2013, zitiert nach Hadenfeldt et al., 2016).

Die erste Verständnisstufe beschreibt den Stand von Kindern, bevor sie mit schulischem Unterricht in Kontakt treten. Ihre Vorstellungen zu Materie sind in dem Alter stark durch die Erfahrungen und Beobachtungen aus dem Alltag geprägt (Liu & Lesniak, 2006; Smith et al., 2006, zitiert nach Hadenfeldt et al., 2016). Es wird zwar erkannt, dass Gegenstände aus unterschiedlichen Materialien bestehen, die Eigenschaften, die diesen zugeschrieben werden, beschränken sich jedoch auf das direkt Wahrnehmbare (Smith, 2007, zitiert nach Hadenfeldt et al., 2016).

Auch wenn Kinder schließlich im Schulunterricht mit dem Teilchencharakter von Materie in Kontakt kommen, sind ihre Vorstellungen durch die Übertragung von Merkmalen makroskopischer Objekte auf Teilchenebene gekennzeichnet. So werden Teilchen oft nicht als kleinste Bausteine der Materie gedacht, sondern jeweils als winzige übrigbleibende Stücke eines Stoffes, wenn man diesen immer weiter zerkleinern würde, mit den dazugehörigen Eigenschaften wie Farbe, Härte, Tem-

3 Das Teilchenmodell der Materie

peratur und Aggregatzustand (Ben-Zvi, Eylon, & Silberstein, 1986; Holding, 1987; Pfundt, 1981, zitiert nach Driver, Squires, Rushworth & Wood-Robinson, 2015). Auf dieser von Hadenfeldt et al. (2016) als zweite Verständnisstufe bezeichneten Niveaustufe wird zwar grundsätzlich von den Schüler*innen akzeptiert, dass es unsichtbare kleinste Teilchen gibt (Smith et al., 2006, zitiert nach Hadenfeldt et al., 2016), es herrschen jedoch oft auch sogenannte Hybridvorstellungen vor, welche Materie auch als ein kontinuierlich zusammenhängendes Ganzes sehen. Das drückt sich zum Beispiel dadurch aus, dass Schüler*innen zum Erklären bestimmter Phänomene Teilchen als in eine Substanz eingebettet beschreiben (Johnson, 2002, zitiert nach Hadenfeldt et al., 2016).

Auf der dritten Verständnisstufe können Schüler*innen für die Erklärung von bestimmten Phänomenen und Aggregatzustandsänderungen Gebrauch von einem einfachen Teilchenmodell machen (Nakhleh, Samarapungavan, & Saglam, 2005, zitiert nach Hadenfeldt et al., 2016). Teilchen werden jedoch für gewöhnlich noch als das betrachtet, was übrig bleiben würde, wenn Materie immer weiter zerkleinert wird (García Franco & Taber, 2009; Liu & Lesniak, 2006; Talanquer, 2009, zitiert nach Hadenfeldt et al., 2016). Außerdem werden den Teilchen häufig noch stoffliche Eigenschaften zugeschrieben (García Franco & Taber, 2009; Löfgren & Helldén, 2009, zitiert nach Hadenfeldt et al., 2016).

Auf der vierten und fünften Verständnisstufe werden Lernende verortet, die differenzierte Teilchenmodelle nutzen und makroskopische Eigenschaften den Teilchen nicht mehr zuschreiben (García Franco & Taber, 2009, zitiert nach Hadenfeldt et al., 2016). Außerdem wird zwischen Atomen und Molekülen unterschieden und es werden unterschiedliche chemische Verbindungen beschrieben (Gómez et al., 2006; Löfgren & Helldén, 2009; Othman et al., 2008; Smothers & Goldston, 2010, zitiert nach Hadenfeldt et al., 2016). Die fünfte Niveaustufe schließt dabei auch eine differenziertere Beschreibung chemischer Reaktionen mit ein und die Erklärung dieser Reaktionen anhand der Interaktionen zwischen den Atomen, Molekülen und Elementarteilchen. In diesen letzten beiden Niveaustufen der von Hadenfeldt, et al. (2016) beschriebenen *Learning Progression* wird deutlich, dass in höheren Jahrgangsstufen für gewöhnlich auch eine Betrachtung des Atomaufbaus stattfindet.

4 Experimente im Physikunterricht

Zur Physik als empirischer Naturwissenschaft gehört das Experimentieren unweigerlich dazu. Die konkreten experimentellen Praktiken haben sich von den Anfängen der physikalischen Forschung bis zur heutigen Zeit zwar stark verändert, und die Experimente, die heutzutage durchgeführt werden, haben wenig gemeinsam mit dem entdeckenden Forschen aus den Zeiten von zum Beispiel Galilei, Newton oder Faraday (Kircher, Girwidz, & Häußler, 2000, zitiert nach Tesch, 2005, S. 35). Dennoch ist das Ziel, Schüler*innen mit naturwissenschaftlichen Arbeitsweisen vertraut zu machen, sicherlich eine ausreichende Legitimation für das Experimentieren im Physikunterricht.

Auch wenn es sich bei der naturwissenschaftlichen Forschungsmethode eher um „eine Haltung, als eine Menge von Regeln für Lösungen von Problemen“ handelt (Bunge, 1983, S. 32, zitiert nach Tesch, 2005, S. 41) und Experimente somit auf vielfältige Weise und mit unterschiedlichem Zweck eingesetzt werden können, zeichnet sich in der schulunterrichtlichen Praxis ein eher undifferenziertes Bild. Wenn Schüler*innen selbst experimentieren, dann geschieht dies in der Regel in einer stark geführten Form, in der sie nicht den erforderlichen Spielraum haben, eigene Ideen zu entwickeln und durch autonomes Arbeiten angemessen zu eigenen Erkenntnissen zu kommen. Darauf weisen sowohl ältere als auch aktuellere Studien hin (z. B. Hodson, 1993; Harlen, 1999; Tesch, 2005, zitiert nach Euler, Schüttler & Hausamann, 2015, S. 773).

Wenn Schüler*innen fast ausschließlich mit stark angeleiteten, standardisierten Experimenten arbeiten, ist besonders problematisch, dass dadurch oft der unangemessene Eindruck entsteht, wissenschaftliches Arbeiten würde nur induktive Verfahren umfassen, die in einer geraden Linie von Beobachtungen und Experimenten zu der Formulierung von Gesetzen führen (Euler et al., 2015, S. 773). Aus diesem Grund besteht in der Fachdidaktik die Forderung, „Experimentieren nicht nur als Beschäftigung mit Materialien zu betreiben, sondern das Mitdenken anzuregen und eine Reflexion der Prozesse zu fördern“ (Tesch, 2005, S. 74).

Was laut Forschungsergebnissen effektives und erfolgreiches Experimentieren ausmacht, fasst Harlen folgendermaßen zusammen:

4 Experimente im Physikunterricht

- “Practical work should be seen as a means to various ends and not as an end in itself.
- The learning that is intended from a particular piece of practical work should be clear and it should be tailored in order that it can serve that purpose effectively.
- Both teachers and pupils need to be aware of the purpose of the practical work in a particular case and prepare for it and follow it up in relation to the specific purpose.
- There are three main purposes for practical work which have emerged from this review:
 - Providing first-hand experience, so that pupils can ‘see it for themselves’ and in some cases do it for themselves, although this purpose is often best served by a good demonstration or a field trip rather than ‘hands on’ practical work.
 - Testing ideas by making predictions, setting up a valid test, collecting reliable evidence and relating what is found to the original idea. This practical work should be theory-based.
 - Experience of ‘doing science’ through carrying out an investigation which has a degree of open-endedness.” (Harlen, 1999, S. 18, zitiert nach Tesch, 2005, S. 50f)

Auch wenn der Einsatz der Experimente gemäß dieser Richtlinien gestaltet wird, ergeben sich immer noch für die konkreten Lernsituationen, abhängig von den jeweiligen Zielen und thematischen Inhalten, verschiedene Funktionen, die Experimente einnehmen können. Eine Unterscheidung je nach Lernszenario ist deshalb sinnvoll.

4.1 Rolle und Funktion des Experimentierens im Physikunterricht

Da das Unterrichtsverfahren auf das jeweilige Unterrichtsziel abgestimmt sein muss und dementsprechend die gewählte Methodik variiert, ergeben sich im Physikunterricht verschiedene Dimensionen von Experimenten. Tesch (2005) stellt diese Dimensionen unter Berücksichtigung der Ergebnisse von Welzel et al. (1998, zitiert nach Tesch, 2005) folgendermaßen dar (s. Abbildung 6).

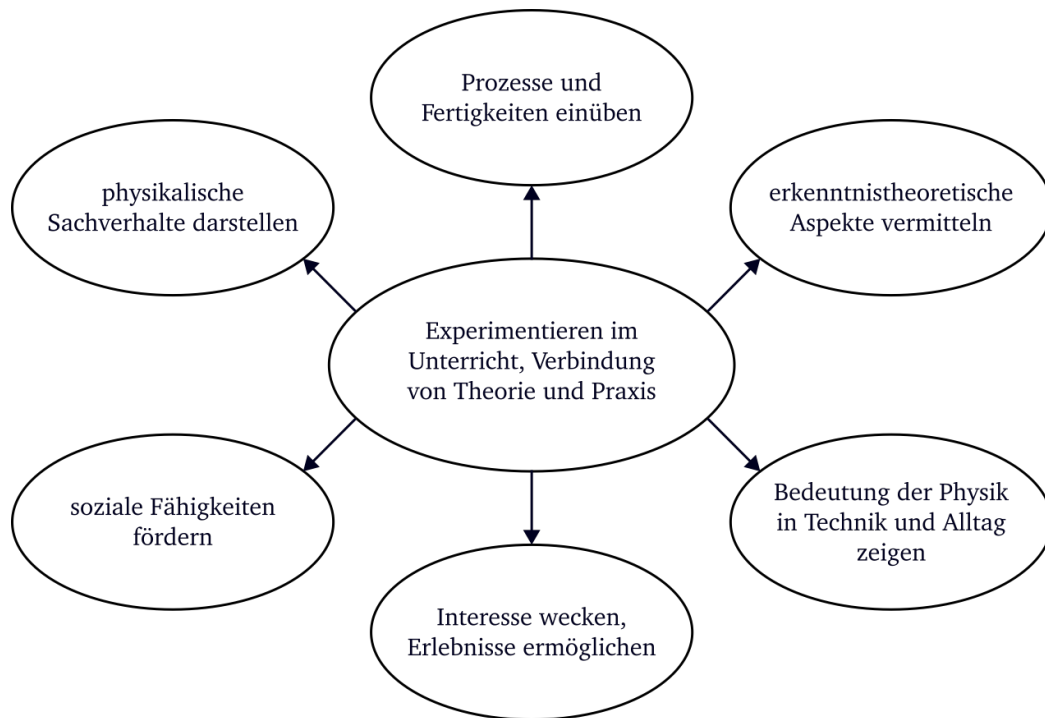


Abbildung 6: Dimensionen des Experimentierens nach Tesch (2005)

Je nach Funktion, die das Experiment erfüllen soll, kann es demnach verschiedene Dimensionen abdecken. Ein von den Schüler*innen in Gruppen durchgeführtes Experiment zu logischen Schaltungen beispielsweise deckt die Dimensionen „Prozesse und Fertigkeiten einüben“, „physikalische Sachverhalte darstellen“ und „soziale Fähigkeiten fördern“ ab (Tesch, 2005, S. 70).

Vergleichbar dazu sind die von Girwidz (2020a) formulierten funktionalen Aspekte von Experimenten (s. Abbildung 7). Wie in dieser Aufzählung deutlich wird, gibt es für den Einsatz von Experimenten im Physikunterricht ein großes Einsatzspektrum, das jeweils von dem unterrichtlichen Ziel abhängt und berechtigterweise mehr als nur das theoriegeleitete Überprüfen von Hypothesen umfasst (Höttecke & Rieß, 2015, S. 136).

Auch für den Einsatz von Experimenten zum Teilchenmodell können unterschiedliche Ansätze gewählt werden. Zum einen dienen experimentelle Phänomene dazu, das Teilchenkonzept und das Verhalten von Teilchen zu veranschaulichen (Funktion 2 in Abbildung 7), zum Beispiel mit Experimenten zur Brownschen Molekularbewegung (Girwidz, 2020a, S. 267).

4 Experimente im Physikunterricht

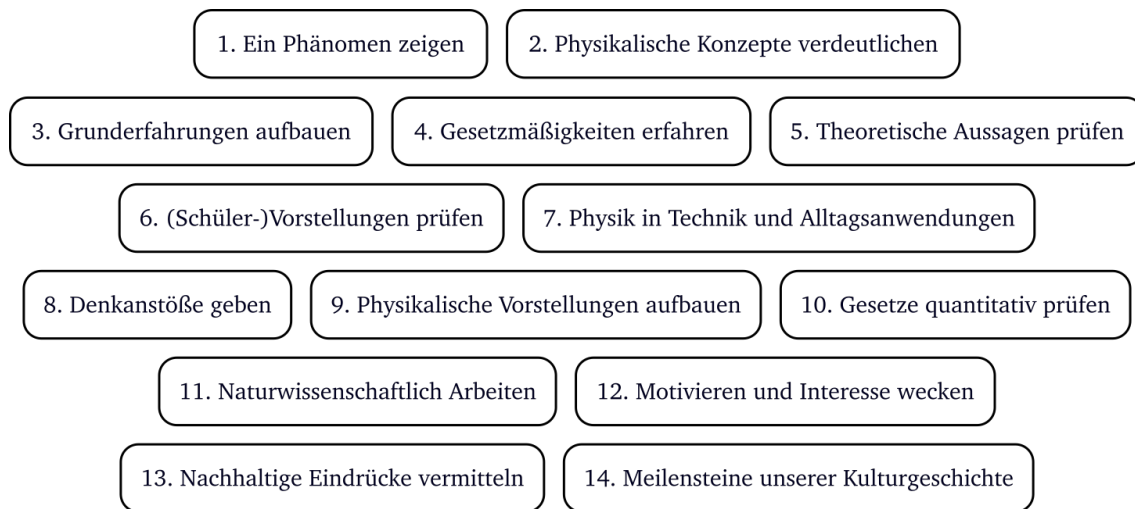


Abbildung 7: Funktionale Aspekte von Experimenten nach Girwidz (2020)

Je nach Aufbereitung können Experimente zum Teilchenmodell auch mit der Funktion „Hypothesen testen“ eingesetzt werden. Die zu testende Hypothese ist in dem Fall die Atomhypothese, die es zu falsifizieren gilt, indem die Experimente so gestaltet sind, dass sie gar nicht oder nur schwer durch eine kontinuierliche Vorstellung über den Aufbau der Materie erklärt werden können (Budimaier, 2022).

Weitere praxisrelevante Klassifizierungsmöglichkeiten für Experimente des Physikunterrichts umfassen die Unterscheidung, ob qualitative oder quantitative Daten erhoben werden, ob die Experimente durch die Lehrperson oder die Lernenden selbst durchgeführt werden, welche Phase des Unterrichts den Rahmen dafür bildet (Einstieg/Erarbeitung/Verständniskontrolle) und welche Geräte genutzt werden (Girwidz, 2020a, S. 27off).

Letzteres lässt sich nicht nur deshalb hervorheben, weil im Allgemeinen der „Materialität“ von den in Experimenten genutzten Instrumenten und Objekten für einen authentischen naturwissenschaftlichen Experimentierprozess eine besondere Bedeutung zukommt (Höttecke & Rieß, 2015). Es ist auch speziell im Themenbereich Struktur der Materie bedeutsam, da hierfür eine große Auswahl an Experimenten existiert, mit teilweise sehr unterschiedlichen Aufbauten: von simplen Geräten, die auch aus dem außerschulischen Alltag bekannt sind, bis hin zu komplexen, vorrangig in der Wissenschaft genutzten Geräten (s. Kapitel 4.3).

4.2 Digitalisierte Experimente

Digitale Medien sind im Physikunterricht fest etabliert und bieten auch für verschiedene Phasen des Experimentierens vielseitige Unterstützungsmöglichkeiten (s. Girwidz, 2020a, S. 285). Auch Experimentierformen, bei denen digitale Medien nicht nur einen geringen Teil des Experiments ausmachen, sondern wesentlicher Bestandteil davon sind, können aus didaktischer Perspektive im Physikunterricht eine sinnvolle Ergänzung oder Alternative zu Realexperimenten darstellen (Meier, Kastaun & Stinken-Rösner, 2022).

Dazu zählen u. a. Virtual- und Augmented Reality-Experimente (z. B. Lindlahr, 2022; Teichrew, 2023b; Teichrew & Erb, 2020), interaktive Bildschirmexperimente (Kirstein & Nordmeier, 2023) sowie (interaktive) Experimentiervideos (Glatz, Erb & Teichrew, 2021; Meier et al., 2022). Auch interaktive Simulationen und animierte Experimente können hier mitgenannt werden (z. B. Laumann & Hoyer, 2023; Perkins et al., 2006; Stinken-Rösner, 2020), wobei diese einen besonderen Platz einnehmen. Simulationen ähneln Experimenten zwar in der Hinsicht, dass eigene Hypothesen überprüft werden können und sich dadurch vergleichbare Wege der Erkenntnisgewinnung ergeben (Laumann & Hoyer, 2023), jedoch imitieren sie authentische Systeme oder Phänomene nur auf Basis eines Modells und einer begrenzten Anzahl an Variablen (Girwidz, 2020b).

Im Gegensatz zu den anderen hier aufgezählten Experimentierformen zeichnen sich Bildschirmexperimente und Experimentiervideos dadurch aus, dass sie typischerweise keine optischen Nachbildungen als Darstellung von Versuchsaufbauten oder überlagerten geometrischen Modellen enthalten. Stattdessen bestehen sie aus Fotos, bzw. Videos von realen Versuchsaufbauten und der Durchführung dieser Versuche (vgl. Glatz, Erb, et al., 2021; Kirstein & Nordmeier, 2023; Meier et al., 2022).

Interaktive Bildschirmexperimente (IBE) sind dabei nach der Methode von Stopp-Trick-Animationen aufgebaut (Kirstein & Nordmeier, 2023), indem die Durchführung der Experimente durch eine Reihe von Fotos präsentiert wird, zwischen denen jeweils nur ein Parameter verändert wird. Jede Manipulation der Experimentiergeräte und jede sich daraus ergebende Reaktion wird somit durch ein Foto festgehalten (ebd.). Das Bedienen eines fertigen IBEs erfolgt dann durch soge-

4 Experimente im Physikunterricht

nannte „direkte Manipulation“ der in den Fotos sichtbaren Elemente, mit der Verwendung „gestenbasierter Handlungen“ (ebd., S. 75f).

Im Gegensatz zu IBEs benutzen Experimentiervideos Bewegtbilder für die Darstellung der Experimente. Sie vereinen somit die Methode des Experimentierens mit dem Werkzeug der Videografie (Stinken-Rösner et al., 2023). Dabei wird auch hier die komplette Durchführung des Experiments dargestellt, sie sind also von Videos zu unterscheiden, die das Experiment mit einem Anleitungscharakter zeigen, der die Lernenden dazu anregen soll, das Realexperiment nachzubauen und durchzuführen (z. B. Mézes, Erb & Schröter, 2012).

Je nach Experiment und didaktischer Zielsetzung kann das Experimentiervideo unterschiedlich ausgestaltet sein, beispielsweise können darin sehr schnelle oder sehr langsame Vorgänge als Zeitlupenaufnahme, bzw. Langzeitbeobachtung dargestellt oder mehrere Perspektiven auf den Versuchsaufbau eingenommen werden. Zusätzliche Gestaltungsmöglichkeiten ergeben sich auch durch das Hinzufügen von Interaktionen, die es der durchführenden Person erlauben, noch mehr Einfluss auf den Verlauf des Experimentiervideos zu nehmen, oder eine gründlichere inhaltliche Verarbeitung erfordern. Solche Interaktionen können zum Beispiel zusätzliche Informationen sein sowie verschiedene Aufgaben- und Testformate. Auf diese Weise interaktiv gestaltete Experimentiervideos haben das Ziel, die Lernenden zumindest teilweise in die Rolle der experimentierenden Person schlüpfen zu lassen, ein selbständiges Bearbeiten in individuellem Tempo zu ermöglichen und aktives Lernen zu fördern (Glatz, Erb & Teichrew, 2020).

In diesem Zusammenhang wird deutlich, warum die Betrachtung der Interaktivität als Merkmal von digitalen oder digital angereicherten Lernmaterialien, in diesem Fall Experimenten, relevant ist. Aus didaktischer Sicht kann die Interaktivität instruktioneller Software definiert werden als „die verschiedensten Möglichkeiten der gegenseitigen Beeinflussung eines Lernenden mit seinen Merkmalen und einer Lernsoftware [...], die in einem steten Wechselspiel stehen und die Wissenserwerbsprozesse optimieren sollen“ (Zumbach, 2010, S. 51). Sie umfasst mehrere Dimensionen von didaktischen und technischen Interaktionen, die untrennbar miteinander verbunden sind. Eine Einschätzung des Interaktivitätsgrads kann deshalb aus unterschiedlichen Perspektiven anhand von verschiedenen Taxonomien vollzogen werden (s. ebd. für einen Vergleich verschiedener Ansätze).

Wie sich verschiedene Interaktivitätsgrade auf den Lernprozess auswirken, ist im Allgemeinen zwar schwer beantwortbar (s. Bos, 2009, zitiert nach Zumbach, 2010), da je nach Lernszenario und Zielgruppe eine Vielzahl an Faktoren darüber entscheiden. Es ist jedoch davon auszugehen, dass eine hohe Interaktivität vor allem Lernumgebungen unterstützt, „bei denen die Exploration von Informationen, deren Bewertung und Synthese eine essentielle Rolle spielen“ (Zumbach, 2010, S. 56, mit Verweis auf Wise & Pepple, 2008), und bei denen authentisches Lernen gewährleistet werden soll (ebd.).

Auch in solchen Fällen muss jedoch auf das richtige Maß an Interaktionsmöglichkeiten geachtet werden, da eine zu große Entscheidungsfreiheit auch zu einer Überforderung des Arbeitsgedächtnisses führen kann (s. Kapitel 2.2.2). Insbesondere Lernende mit einem geringen thematischen Vorwissen können von einem weniger komplexen Angebot profitieren (Zumbach, 2010), da für sie dann eher ausreichend kognitive Ressourcen für die Bearbeitung der inhaltsrelevanten Informationen zur Verfügung stehen.

Für das Erstellen von digitalisierten Experimenten, beispielsweise von interaktiven Experimentiervideos, bedeutet dies ein Abwägen verschiedener Faktoren: Je nach Vorwissen der Lernenden, nach thematischem Inhalt und Lernziel sowie nach unterrichtlicher Phase, in der das Experiment oder Teile des Experiments eingesetzt werden sollen (vgl. Stinken-Rösner et al., 2023) sind unterschiedliche Interaktivitätsgrade des Mediums sinnvoll. Aktives und exploratives Lernen profitieren von einem hohen Grad an Interaktivität, insbesondere wenn Vorgänge der realen Welt authentisch abgebildet werden sollen (Zumbach, 2010). Außerdem sollte in jedem Fall auf die aus medienpsychologischer Sicht lernförderliche Gestaltung der digitalen Anteile geachtet werden (s. Kapitel 2.2).

4.3 Experimente zum Teilchenmodell

Für dieses Forschungsvorhaben sind ausschließlich Experimente zum Teilchenmodell von Interesse, die für eine Einführung dieses Themas in der Sekundarstufe I geeignet sind. Hier wird die Frage nach deren Überzeugungskraft besonders relevant, da Schüler*innen zum ersten Mal, zumindest im Schulunterricht, mit dem Thema in Kontakt kommen.

4 Experimente im Physikunterricht

Auch wenn es für diesen Zweck eine große Auswahl an Experimenten gibt, besteht die Schwierigkeit, dass Teilchen nicht direkt sichtbar gemacht werden können und selbst durch anschauliche Experimente nur auf deren Existenz geschlossen werden kann. Gezwungenermaßen muss man sich auf die Untersuchung von Phänomenen, die (bestenfalls nur) durch den teilchenhaften Charakter der Materie erklärt werden können, beschränken. Hinzu kommt die Herausforderung, dass es zahlreiche dokumentierte Schülervorstellungen gibt, deren Ursache in der Übertragung von makroskopischen Eigenschaften der beobachtbaren Objekte auf die Teilchenebene liegt (s. Kapitel 3.2.1). Deshalb sollten die Experimente zwar anschauliche Phänomene zeigen, gleichzeitig aber auch wenig Möglichkeiten bieten, unpassende Vorstellungen aufzubauen.

Unter diesen Gesichtspunkten werden im Folgenden gängige Experimente zum Teilchenmodell vorgestellt und diskutiert. Sie können verschiedenen inhaltlichen Kategorien zugeordnet werden³.

4.3.1 Experimente zur Vorstellung „Teilchen sind in ständiger Bewegung“

In dieser Kategorie befinden sich Experimente, die Aussagen der kinetischen Gastheorie stützen. Zu den anschaulichen Experimenten, die die selbständige Bewegung von Teilchen hervorheben, gehören die Beobachtung der Brownschen Molekularbewegung von sichtbaren Rauchteilchen in der Luft oder von Fetttröpfchen in einer Milch-Wasser-Emulsion unter dem Mikroskop (s. z.B. Dahncke, Götz & Langensiepen, 1986; Fischler & Rothenhagen, 1997). Die Bewegung dieser sichtbaren Partikel wird durch die eigenständige, unregelmäßige Bewegung unsichtbarer Teilchen erklärt. Der Vorteil der Brownschen Bewegung in Luft gegenüber der in Wasser ist, dass die Bewegungsamplituden der Partikel größer sind und sich dadurch besser wahrnehmen lassen.

Ebenso durch die eigenständige Bewegung der Teilchen erklärbar sind Diffusionsversuche mit flüssigen oder gasförmigen Stoffen (s. ebd.). Die Vermischung von Gasen kann zum Beispiel durch die Diffusion von farbigem Bromdampf in der Luft

³ Die Kategorieneinteilung orientiert sich auch an der von Hofmann erstellten Zuordnung von Experimenten zum Teilchenmodell zu verschiedenen Themenkomplexen: Hofmann, M. (2017). Zur Überzeugungskraft von Experimenten zum Teilchenmodell (Wissenschaftliche Hausarbeit). Goethe-Universität Frankfurt.

demonstriert werden, während sich bei Flüssigkeiten die Beobachtung von farbigen Stoffen in Wasser anbietet, die sich darin lösen und langsam diffundieren (ebd.).

Es gibt außerdem die Möglichkeit, experimentell auf die Abhängigkeit der Brownschen Molekularbewegung von der Temperatur in Flüssigkeiten einzugehen, was jedoch nicht einfach zu demonstrieren ist, da die gleichzeitig stattfindende Viskositätsänderung für die stärkere Bewegung der Teilchen hauptverantwortlich ist und mitberücksichtigt werden muss (Dahncke et al., 1986). Aus demselben Grund ist auch eine Erklärung der im warmen Wasser schneller stattfindenden Diffusion von Tee oder einer Kaliumpermanganatlösung mit der stärkeren Molekularbewegung problematisch. Die beobachtbaren Effekte entstehen hauptsächlich aufgrund von Konvektionsströmungen. Bei einer bloßen Erklärung mit der Molekularbewegung kann ein falscher Eindruck für deren Größenordnung entstehen (Riegel, 2018).

4.3.2 Experimente zur Vorstellung „Zwischen Teilchen ist leerer Raum“

Auch diese Teilcheneigenschaft stammt aus den Beschreibungen der kinetischen Gastheorie. Sie hat für die Einführung des Teilchenmodells eine besondere Bedeutung, da sie einer gut dokumentierten Schülervorstellung widerspricht, der die Vermischung der makroskopischen- und der Teilchenebene zugrunde liegt (s. Kapitel 3.2.1).

Experimente in dieser Kategorie gibt es in mehreren Ausführungen. Eine verbreitete Variante ist die Beobachtung des Volumenverlusts beim Mischen von Ethanol und Wasser (Fischler et al., 1998). Die damit einhergehende Erklärung, die kleineren Teilchen der einen Flüssigkeit würden sich zwischen die größeren Teilchen der anderen Flüssigkeit begeben, wird oft mit dem Modellversuch veranschaulicht, in dem verschiedengroße Kügelchen, zum Beispiel Erbsen und Senfkörner, in einem Behälter gemischt werden (ebd.). Dabei ist neben der didaktischen Gefahr, Schüler*innen könnten unangemessene makroskopische Eigenschaften auf die Teilchenebene übertragen, auch die fachliche Erklärung problematisch. Der Effekt ist tatsächlich mit einer exothermen chemischen Reaktion zwischen dem Alkohol und dem Wasser zu erklären, aufgrund derer neue Verbindungen entstehen. Das wird auch durch die Temperaturerhöhung des Gemisches deutlich. Eine rein

4 Experimente im Physikunterricht

physikalische Erklärung, die kleinere Moleküle beschreibt, als würden sie in die Räume zwischen den größeren Molekülen „rutschen“, ist deshalb unpassend und könnte auch nicht den gegenteiligen Effekt der Volumendilatation erklären, den man zum Beispiel beim Mischungsvorgang von Benzol und Essigsäure beobachtet (ebd.).

Alternative Experimente, die den leeren Raum zwischen Teilchen thematisieren, sind die Diffusion durch eine halbdurchlässige Membran und die Beobachtung der veränderten Dichte einer Kochsalzlösung.

Ersteres wird gerne verwendet, um das Platzen einer Kirsche zu erklären, das über einen längeren Zeitraum in Wasser gelassen wird. Die Argumentation verläuft typischerweise damit, dass die Kirschhaut Wasserteilchen passieren lässt, während sie für die Zuckerteilchen undurchlässig ist. Der dadurch entstehende osmotische Druck soll die Kirsche zum Platzen bringen (Fischler & Rothenhagen, 1997). Auch wenn diese vergleichsweise einfache Erklärung plausibel erscheint und weit verbreitet ist (Bathe, Bartelheimer & Asshoff, 2021), geht sie nicht weit genug. Zwar sind osmotische Vorgänge beteiligt, das Platzen der Kirschhaut ist allerdings vielmehr ein örtliches Phänomen, das auf sogenannte Mikrorisse in der Kutikula, Austritt von Äpfelsäure und Zellwandquellung zurückzuführen ist (ebd.). Für eine gründliche Erklärung ist also ein komplexeres Verständnis über die biologischen Vorgänge nötig, das erst in der Sekundarstufe II vermittelt wird.

In dem anderen weiter oben erwähnten Experiment wird ein Ei als Indikator für die Dichteänderung verwendet, das in Wasser untergeht, während es in der Salzlösung schwimmt (Harrison & Treagust, 2006). Dabei ist wie auch bei dem Mischversuch mit Ethanol und Wasser auf eine passende Elementarisierung zu achten. Die Umstrukturierung auf Teilchenebene aufgrund der Salz-Auflösung sollte nicht durch ein bloßes „Rutschen“ kleinerer Teilchen zwischen größeren erklärt werden.

4.3.3 Experimente zum Kristallisationsprozess

Um der Vorstellung vorzubeugen, Teilchen wären das letzte Teilungsstück eines Kontinuums und stattdessen die Vorstellung zu unterstützen, sie seien der „erste Aufbaustein“ der Materie (Pfundt, 1981) können Experimente eingesetzt werden, mit denen sich der Kristallisationsprozess beobachten lässt (zum Beispiel nach Fischler et al., 1998). Die Entstehung der unter dem Mikroskop beobachtbaren Strukturen, beispielsweise von Salz- oder Zuckerkristallen, ist ohne die Verwen-

derung einer Teilchenstruktur der Materie als Erklärung schwierig (ebd.). Außerdem sind diese Versuche dazu geeignet, auf die Teilchen als „Informationsträger“ bestimmter erfahrbarer Eigenschaften der makroskopischen Stoffe aufmerksam zu machen: Das Salz oder der Zucker sind nach der Kristallisation wieder weiß und schmecken salzig, bzw. süß, auch wenn sie zwischendurch im Wasser aufgelöst und dadurch nicht sichtbar waren.

4.3.4 Experimente zum Thematisieren von mikroskopischen und makroskopischen Eigenschaften

Um explizit den Unterschied zwischen mikroskopischen und makroskopischen Eigenschaften von Stoffen zu thematisieren, können Experimente wie die Elektrolyse mit Knallgasreaktion verwendet werden. Dabei kann sowohl auf das Gesetz der konstanten Proportionen eingegangen werden, als auch auf die Reversibilität von Prozessen, der die Teilchenart und deren Struktur untereinander zugrunde liegt. Als Alternative zu diesem Experiment gibt es mehrere Möglichkeiten, beispielsweise der Nachweis, dass eine bestimmte Masse Kupfer immer nur mit einer bestimmten Masse Schwefel reagiert (Fischler & Rothenhagen, 1997).

Um auf den Teilchencharakter von Materie zu schließen und gleichzeitig die etwaige Größe eines Ölmoleküls zu bestimmen, eignet sich das Ölfleckexperiment (zum Beispiel nach Wilke, 1997). Obwohl es in seiner Durchführung und Auswertung etwas aufwändiger ist, wird das Experiment auch als „Schüler(praktikums)experiment“ empfohlen (ebd.).

Außerdem können Aggregatzustandsänderungen gut mit dem Teilchenmodell erklärt werden. Dafür eignen sich Experimente, die das Schmelzen oder Erstarren von Wasser oder anderer Stoffe unter Berücksichtigung der Temperaturbilanz untersuchen (Dahncke et al., 1986). Diese Experimente sind jedoch nicht voraussetzungsarm, da für ihre korrekte Deutung ein Verständnis von Energieübertragungsprozessen benötigt wird.

4.3.5 Experimente zum „Sichtbarmachen“ von Teilchen

Experimente der modernen Physik, die auf direkte Weise die Existenz von Teilchen nahelegen, können zwar sehr anschaulich sein, bergen aber gleichzeitig die Gefahr, dass das Sichtbare als tatsächliche Abbilder der Atome interpretiert wird.

4 Experimente im Physikunterricht

Für den Kontext der Einführung des Teilchenmodells sind noch am ehesten Experimente wie die Szintillationen einzelner Teilchen an einem Zinksulfidschirm (Fischler et al., 1998), das Feldemissionsmikroskop oder das Rastertunnelmikroskop geeignet, da Nebelkammeraufnahmen oder Streuexperimente sehr voraussetzungsreich sind.

Im Vergleich zum Rastertunnelmikroskop haben das Feldemissionsmikroskop und die Szintillationen am Zinksulfidschirm den Vorteil, dass keine digitalen, sondern analoge Bilder erzeugt werden, deren Entstehung dadurch einfacher nachzuvollziehen ist. Im Falle des Feldemissionsmikroskops werden unter Ausnutzung des Tunneleffekts aus einer sehr dünnen Wolframspitze Elektronen einzelner Atome herausgelöst und auf dem Schirm sichtbar gemacht. Da an den Stellen hoher Elektronendichte die Auslöserate auch entsprechend hoch ist, kann aufgrund des entstehenden Bilds auf die Atomstruktur geschlossen werden. Besonders eindrucksvoll ist dabei das spezifische Bild einzelner Barium-Atome, das erzeugt werden kann, indem ein Teil des Barium-Gases im Kolben verdampft und von der kalten Kathodenspitze absorbiert wird. Schon eine qualitative Betrachtung des so entstehenden Bildes kann als Argument genutzt werden, dass es auf atomarer Ebene einen strukturierten Aufbau geben muss.

Empirischer Teil

5 Studiendesign

Teile der in diesem Kapitel enthaltenen Inhalte wurden bereits veröffentlicht (s. Glatz, Erb, et al., 2021; Glatz, Teichrew & Erb, 2021; Glatz et al., 2020).

5.1 Forschungsfragen

Im Mittelpunkt dieser Arbeit steht die Frage nach der Überzeugungskraft von Experimenten zum Teilchenmodell. Sie ergibt sich zum einen daraus, dass bei diesem Thema häufig konzeptionelle Schwierigkeiten auftreten (s. Kapitel 3.2) was damit zusammenhängt, dass der submikroskopische Aufbau der Materie nicht direkt beobachtet werden kann. Selbst anschauliche Experimente können nicht weitergehen, als den diskontinuierlichen Aufbau der Materie lediglich nahelegen und zur Formulierung von theoretischen Modellen zu führen, die die experimentellen Beobachtungen am passendsten beschreiben.

Hinzu kommt, dass die Zahl der Experimente, die für solch einen Zweck auch im naturwissenschaftlichen Unterricht der Sekundarstufe I genutzt werden können, groß ist (s. Kapitel 4.3). Dementsprechend ist ein vergleichender Blick von Interesse und es ergibt sich folgende Forschungsfrage:

Forschungsfrage 1: Welche der üblicherweise im Unterricht verwendeten Experimente zum Teilchenmodell sind überzeugend?

Hierbei wird die Überzeugungskraft als Eigenschaft der Experimente verstanden, zu einer positiven Veränderung der individuellen Teilchenvorstellungen beizutragen. Operationalisiert wird sie, wie in Kapitel 2.3 beschrieben, durch die Akzeptanz der durch die Experimente übermittelten Botschaft, also des jeweiligen Aspekts des Teilchenmodells.

Zu erwarten ist, dass sich selbst bei einer Auswahl an Experimenten, die aus didaktischer Sicht gut für die Vermittlung eines angemessenen Teilchenmodells eignen, Unterschiede in deren Überzeugungskraft zeigen. Diese Vermutung ergibt sich vor allem daraus, dass sich die Experimente in ihrer inhaltlichen Schwierigkeit und den verwendeten Materialien unterscheiden.

Forschungsfrage 2: Inwieweit hängt die Überzeugungskraft der Experimente mit deren inhaltlichen Schwierigkeit und der Komplexität des Aufbaus zusammen?

Diese Betrachtung der Überzeugungskraft in Abhängigkeit von generalisierbaren Merkmalen der Experimente ist auch deshalb interessant, da sich dadurch die Ergebnisse zumindest teilweise auch auf Experimente anderer Themengebiete übertragen lassen.

5.2 Verwendetes Teilchenmodell

Als Grundlage für die Auswahl der Experimente, aber auch für deren didaktischen Aufbereitung steht an erster Stelle das verwendete Teilchenmodell. Dieses soll für eine Einführung in der Sekundarstufe I geeignet sein, gleichzeitig aber möglichst keine veranschaulichenden Beschreibungen enthalten, die sich mit komplexeren Teilcheneigenschaften widersprechen, die in der späteren Unterrichtslaufbahn behandelt werden. Es soll also für die betrachteten Phänomene und Beobachtungen möglichst erklärungsstark sein und gleichzeitig nur die nötigsten Beschreibungen enthalten, die für ein angemessenes Konzeptverständnis gebraucht werden.

Wie schon frühere Arbeiten zeigen⁴, besteht ein unter diesem Vorsatz formuliertes Teilchenmodell dennoch aus einer großen Anzahl an Aspekten, die bei einer angemessenen Beschreibung typischer Schulversuche entweder explizit vermittelt oder implizit mitgedacht werden müssen. Insbesondere wenn auch Experimente genutzt werden, in denen verschiedene Aggregatzustände oder chemische Reaktionen eine Rolle spielen, reichen die aus der kinetischen Gastheorie abgeleiteten Teilchenbeschreibungen nicht aus.

Das hier genutzte Teilchenmodell orientiert sich somit an dem Modell von Dalton sowie an Annahmen aus der kinetischen Gastheorie (s. Kapitel 3.1 für die wesentlichen Aussagen dieser zwei Theorien). Mit dem Ziel, diese zwei Modelle zu ergänzen, bzw. zu konkretisieren, werden im Folgenden zusätzliche Teilchenbeschreibungen⁵ aufgeführt, die für eine konsistente Erklärung der in den Experimenten gezeigten Phänomenen nötig sind:

⁴ Hofmann, M. (2017). Zur Überzeugungskraft von Experimenten zum Teilchenmodell (Wissenschaftliche Hausarbeit). Goethe-Universität Frankfurt.

⁵ Entnommen und leicht angepasst aus Hofmann, M. (2017).

- Die Thematisierung einer Substruktur der Teilchen ist nicht erforderlich. Aus diesem Grund und weil der Atom-Begriff vermutlich durch zahlreiche alltägliche Vorstellungen bereits besetzt ist, wird anders als im Dalton-Modell der Begriff „Teilchen“ verwendet.
- Die Teilchen besitzen die Eigenschaft, andere Teilchen anziehen oder abstoßen zu können.
- Aufgrund dieser Eigenschaft ist es möglich, dass sich unterschiedliche Strukturen bilden. Diese äußern sich auch in einer Änderung der makroskopischen Merkmale der Stoffe und lassen sich Kategorien zuordnen (Aggregatzustände).
- Bei einer Änderung des Aggregatzustandes wird nur die Struktur der Teilchen des Stoffes geändert.
- Die mikroskopischen Eigenschaften der Teilchen bestimmen die Strukturen, die sie untereinander bilden können. Die Struktur, mit der die Teilchen geordnet sind, ist für die makroskopischen Eigenschaften des Stoffes verantwortlich.
- Werden unterschiedliche Stoffe zusammengebracht, können sich dadurch die makroskopischen Eigenschaften ändern, verloren gehen, erhalten bleiben oder auch grundlegend neue Eigenschaften bilden. Das Endprodukt kann sich von den Ausgangsstoffen gänzlich unterscheiden. In keinem Fall ändern sich die Teilchen selbst, gehen verloren oder werden neu geschaffen.
- Chemische Verbindungen sind nur in bestimmten Verhältnissen möglich. Diese hängen von den Eigenschaften der beteiligten Teilchen ab.
- Stoffveränderungen, wie zum Beispiel Aggregatzustandswechsel, Verbindung, Trennung, Vermischen mehrerer Reinstoffe oder Lösen können prinzipiell wieder rückgängig gemacht werden

5.3 Auswahl der Experimente

Mit dem Ziel, möglichst viele der aufgezählten Aspekte des Teilchenmodells abzudecken, werden acht Experimente aus allen der in Kapitel 4.3 beschriebenen Kategorien ausgewählt. Im Folgenden werden diese Experimente kurz beschrieben und ihre Auswahl begründet.

Brownsche Molekularbewegung in der Rauchkammer

Das Experiment besteht aus einer Rauchkammer, die teilweise durchsichtige Wände besitzt. Dadurch lässt sich ein Laser auf den in der Kammer befindlichen Rauch richten. Mithilfe eines Mikroskops können anschließend die durch das Laserlicht beleuchteten Rauchpartikel beobachtet werden.

Dieses Experiment wird der Beobachtung von Fetttröpfchen in einer Wasser-Milch-Emulsion vorgezogen, da sich die vergleichsweise heftige Bewegung der Rauchpartikel gut beobachten lässt. Für die restliche Arbeit wird das Experiment *Partikel in der Rauchkammer* genannt und an manchen Stellen mit dem Kürzel RA versehen.

Diffusion von Farbstoff in Wasser

In ein mit Wasser gefülltes Becherglas wird ein Trichter gestellt, der möglichst weit zum Boden des Glases reicht. In diesen Trichter werden kleine Kaliumpermanganat-Kristalle gegeben, die an den Boden des Glases sinken und sich dort lösen. Der Trichter wird im Becherglas gelassen, um Verwirbelungen zu vermeiden. Bei möglichst konstanter Temperatur wird über mehrere Tage hinweg die Diffusion der sich am Boden gebildeten konzentrierten farbigen Lösung mit dem restlichen Wasser beobachtet.

Dieses Experiment ist ähnlich anschaulich wie die Diffusion von Bromdampf in Luft. Da jedoch die Durchführung des Bromdampf-Experiments aufwändiger ist, wird die Diffusion in Flüssigkeiten gewählt. Für die restliche Arbeit wird das Experiment *Farbstoff in Wasser* genannt und an manchen Stellen mit dem Kürzel FA versehen.

Schwimmendes Ei in Salzwasser

Ein Hühnerei wird als Indikator dafür verwendet, dass sich die Dichte von Wasser nach Hinzufügen von Kochsalz ändert: Es schwimmt im Salzwasser, während es zuvor in gewöhnlichem Wasser noch unterging. Der Lösevorgang des Salzes in Wasser wird anhand des Teilchenmodells erklärt, während auch auf die Volumenverringerung eingegangen wird. Dabei wird mit der Umstrukturierung der Teilchen untereinander argumentiert, um nicht die Vorstellung zu unterstützen, kleinere Teilchen würden in die Zwischenräume größerer Teilchen rutschen.

Das Alternativexperiment *Mischen von Ethanol und Wasser* wird aufgrund der voraussetzungsreichen Erklärung nicht ausgewählt, bei der auch auf die chemische Reaktion eingegangen werden müsste. Für die restliche Arbeit wird das Experiment *Ei in Salzwasser* genannt und an manchen Stellen mit dem Kürzel ES versehen.

Bilden und Lösen von Salzkristallen

In diesem Experiment werden die sich verändernden, bzw. gleichbleibenden Eigenschaften von Kochsalz beobachtet. Zu Beginn wird Salz in Wasser vollständig gelöst. Anschließend wird das Salzwasser in eine Petrischale gegossen und bei Zimmertemperatur stengelassen. Die sich nach einiger Zeit bildenden Salzkristalle werden unter dem Mikroskop betrachtet und mit Mikroskopaufnahmen des Salzes vor dem Lösevorgang verglichen.

Wie hier wird das Experiment auch weiterhin *Bilden und Lösen von Salzkristallen* genannt. Es wird an manchen Stellen mit dem Kürzel SK versehen.

Experiment zum Gesetz der konstanten Proportionen

In diesem Experiment wird mithilfe des Hofmannschen Zersetzungsapparats die Elektrolyse von Wasser beobachtet, das für eine bessere Leitfähigkeit mit Schwefelsäure durchsetzt ist. Nach einiger Zeit ist in den Messröhren des Apparats ein Verhältnis von 1:2 zwischen Wasserstoff und Sauerstoff zu erkennen.

Dieses Experiment wird gewählt, da es die proportionale Verbindung von Stoffen anschaulich demonstriert und das Ergebnis leicht zu erkennen und zu interpretieren ist. Experimente, die feste Masseverhältnisse bei chemischen Reaktionen demonstrieren, wären ebenso denkbar gewesen. Der Zersetzungsapparat hat jedoch den Vorteil, dass das Ergebnis schneller erreicht wird und mit weniger Aufwand verbunden ist. Für die restliche Arbeit wird das Experiment *Gesetz der konstanten Proportionen* genannt und an manchen Stellen mit dem Kürzel KP versehen.

Elektrolyse mit Knallgasreaktion

Auch in diesem Experiment wird der Hofmannsche Zersetzungsapparat verwendet, der Fokus wird aber auf die Reversibilität des Prozesses gelenkt. Nach der Zersetzung von Wasser in seine zwei Bestandteile wird der einen Messröhre mithilfe eines Reagenzglases Wasserstoffgas entnommen und an eine Flamme gehalten. Das Wasserstoff-Luft-Gemisch reagiert exotherm mit einem hörbaren Knallge-

räusch. Dabei entsteht Wasser, das als feine Tröpfchen an den inneren Wänden des Reagenzglases zu erkennen ist.

Wie hier wird dieses Experiment auch weiterhin *Elektrolyse mit Knallgasreaktion* genannt. An manchen Stellen wird es mit dem Kürzel EK versehen.

Ölfleckversuch

In diesem Experiment wird die Ausdehnung eines Ölflecks auf Wasser betrachtet, um damit auf das Vorhandensein von Teilchen zu schließen und auf die Annahme, dass sie eine feste Größe besitzen. Dafür wird eine ausreichend große Petrischale mit Wasser gefüllt und mit Bärlappsporen bestreut. Anschließend wird ein Tropfen mit Benzin verdünnte Ölsäure auf das Wasser getropft. Das Benzin verdunstet sofort und trägt somit nicht zu der Ausdehnung des Ölflecks bei. Werden nun schrittweise weitere Tropfen des gleichen Volumens Ölsäure aufgetragen und die entstehenden Ölflecke gemessen, kann man eine zum Ölvolumen proportionale Vergrößerung der Fläche feststellen. Das spricht für die Interpretation, dass es sich bei dem Ölfleck um eine monomolekulare Schicht handelt, da jeweils das gesamte Volumen des Öltropfens in die Fläche des Ölflecks eingeht und nicht auch in seine Höhe.

Unter der Annahme einer monomolekularen Schicht lässt sich aus den Volumen der Tropfen und der Flächen der Ölflecke auch die Größe eines Ölmoleküls abschätzen, was im Rahmen dieser Durchführung jedoch nicht gemacht wird. Im nachfolgenden Text wird der *Ölfleckversuch* an manchen Stellen mit dem Kürzel OL versehen.

Feldemissionsmikroskop

Aus den Experimenten, die anhand von Methoden der modernen Physik den strukturierten Aufbau von Materie veranschaulichen, fällt die Wahl auf das Feldemissionsmikroskop, da hier die Bildentstehung vergleichsweise einfach zu erklären ist. Gegen die Beobachtung von Szintillationen einzelner Teilchen auf einem Zinksulfidschirm spricht die Gefahr, dass Schüler*innen die Szintillationen als die Teilchen selbst wahrnehmen könnten oder davon ausgehen, sie würden eine vergleichbare Größe haben.

Das *Feldemissionsmikroskop* wird an manchen Stellen im Text mit dem Kürzel FE versehen.

5.4 Gestaltung der Experimente als interaktive Videos

Aufgrund des vorliegenden Studiendesigns (s. Kapitel 6 für eine detaillierte Beschreibung), durch das ein Vergleich der Experimente zum Teilchenmodell möglich gemacht werden soll, ist eine gleichbleibende Präsentation der Experimente erforderlich. Da eine Demonstration der Experimente durch eine Expertin oder einen Experten stark von der Durchführungsart dieser Person abhängt und dadurch leicht personenabhängige Unterschiede zwischen den Versuchsdurchführungen entstehen können, wird sich gegen den Einsatz von Demonstrationsexperimenten entschieden.

Eine alternative Möglichkeit wäre der Einsatz von Realexperimenten, die die Schüler*innen selbständig durchführen, was sich jedoch aufgrund der ausgewählten Experimente, die teilweise Langzeitbeobachtungen und vergleichsweise komplizierte Versuchsdurchführungen beinhalten, als schwierig erweist. Außerdem steht im Fokus dieser Erhebung die Überzeugungskraft der Experimente, weshalb möglichst gut gelingende Versuchsdurchführungen erwünscht sind, die die relevanten Phänomene auf bestmögliche Art darstellen.

Deshalb sind die Experimente als interaktive Experimentiervideos gestaltet⁶, die sowohl eine kontrollierte und gelungene Durchführung der Experimente zeigen als auch ein selbstständiges Bearbeiten durch die Schüler*innen erlauben, in eigenem Tempo und auf individuelle Weise (s. Kapitel 4.2 für eine allgemeine Beschreibung interaktiver Experimentiervideos). Damit dies auf alle der ausgewählten Experimente in gleichem Maße zutrifft, sie einem hohen qualitativen Standard entsprechen und sich im Rahmen dieser Studie gut vergleichen lassen, sind die interaktiven Experimentiervideos nach einer einheitlichen Struktur gestaltet. Das betrifft sowohl das Videomaterial als auch die interaktiven Elemente, die diesem hinzugefügt sind. Nach den aus der Wahrnehmungspsychologie abgeleiteten Richtlinien für die Gestaltung von Demonstrationsexperimenten (Girwidz, 2015, S. 236ff) wird bei der Verfilmung der Experimente insbesondere auf Symmetrie und Übersichtlichkeit geachtet. Für gute Sichtbarkeit werden ein einheitlicher Hintergrund und gute Lichtverhältnisse verwendet. Die für die Versuchsdurchführung genutzten Experimentiermaterialien sind möglichst zentral platziert, und auf nicht

⁶ Eine URL mit den in der Erhebung verwendeten interaktiven Experimentiervideos ist am Ende des Anhangs zu finden.

unbedingt notwendige Gegenstände wird verzichtet. Zusätzlich zu der Kameraperspektive, die den gesamten Versuchsaufbau aus Frontalperspektive zeigt, werden relevante Teile der Versuchsdurchführung in Nahaufnahme oder aus einem anderen Blickwinkel gefilmt. Dabei wird darauf geachtet, dass mehrere Kameras gleichzeitig eingesetzt werden, die jeweils dieselbe eine Versuchsdurchführung filmen. Schließlich sollen die Schüler*innen bei der späteren Durchführung der interaktiven Experimentiervideos stets dieselbe Versuchsdurchführung betrachten, auch wenn sie die Kameraperspektive wechseln.

Versuchsteile, die vergleichsweise lange dauern, können durch die interaktiven Elemente zum Teil zwar übersprungen werden (zum Beispiel das Umrühren des Salzwassers, bis sich das Salz komplett gelöst hat), die Vorgänge sind jedoch in voller Länge im Video enthalten. Das soll den Schüler*innen die Möglichkeit geben, die Prozesse realitätsnah betrachten zu können. Eine Ausnahme bilden die Langzeitbeobachtungen aus den Versuchen *Farbstoff in Wasser* und *Bilden und Lösen von Salzkristallen*. Da diese mehrere Stunden, bzw. Tage dauern, werden Zeitrafferaufnahmen verwendet, was in den Experimentiervideos auch entsprechend gekennzeichnet ist.

Tabelle 2: Fachdidaktische (1 – 4) und mediendidaktische (5 – 7) Strukturelemente der interaktiven Experimentiervideos.

Strukturelement	Ziel
1 zu vermittelnder Aspekt des Teilchenmodells	durch das Experiment zu überprüfende Modellaussage einführen (angelehnt an den Kreislauf der Erkenntnisgewinnung)
2 Ziel und Aufbau des Experiments	erhöhte kognitive Verarbeitung des Aufbaus sicherstellen
3 Hypothesenbildung/-auswahl	Überprüfung von Hypothesen durch das Experiment ermöglichen
4 Auswertung des Experiments	klaren Bezug zum Teilchenmodell herstellen
5 nicht-lineare Bearbeitung	individuelles Bearbeitungstempo und wählbare Bearbeitungsreihenfolge ermöglichen
6 Lern- und Aufmerksamkeitskontrollen	oberflächliche Bearbeitung des Experiments vermeiden
7 optionale, zusätzliche Hilfen	Binnendifferenzierung ermöglichen

Auch die interaktiven Elemente sind nach einer einheitlichen Struktur erstellt, die sich an fach- und mediendidaktischen Prinzipien orientieren (s. Tabelle 2). Sie sollen einerseits den Schüler*innen die Entscheidungsfreiheit bieten, bestimmte Teile der Experimente in frei gewählter Reihenfolge und Häufigkeit durchzuführen, und gleichzeitig die Aufmerksamkeit auf inhaltlich wesentliche Aspekte zu lenken.

Zu Beginn eines jeden interaktiven Experimentiervideos wird das Ziel des Experiments benannt. Auch wenn der Ausgang des Experiments nicht vorweggenommen wird, steht dabei der zu untersuchende Aspekt des Teilchenmodells im Fokus. Außerdem wird anhand eines Standbilds der Versuchsaufbau präsentiert. Es erscheinen zusätzliche Informationen zu den Geräten und ihrem jeweiligen Zweck, markiert durch anklickbare Buttons, die direkt an den Geräten platziert sind, die sie beschreiben.

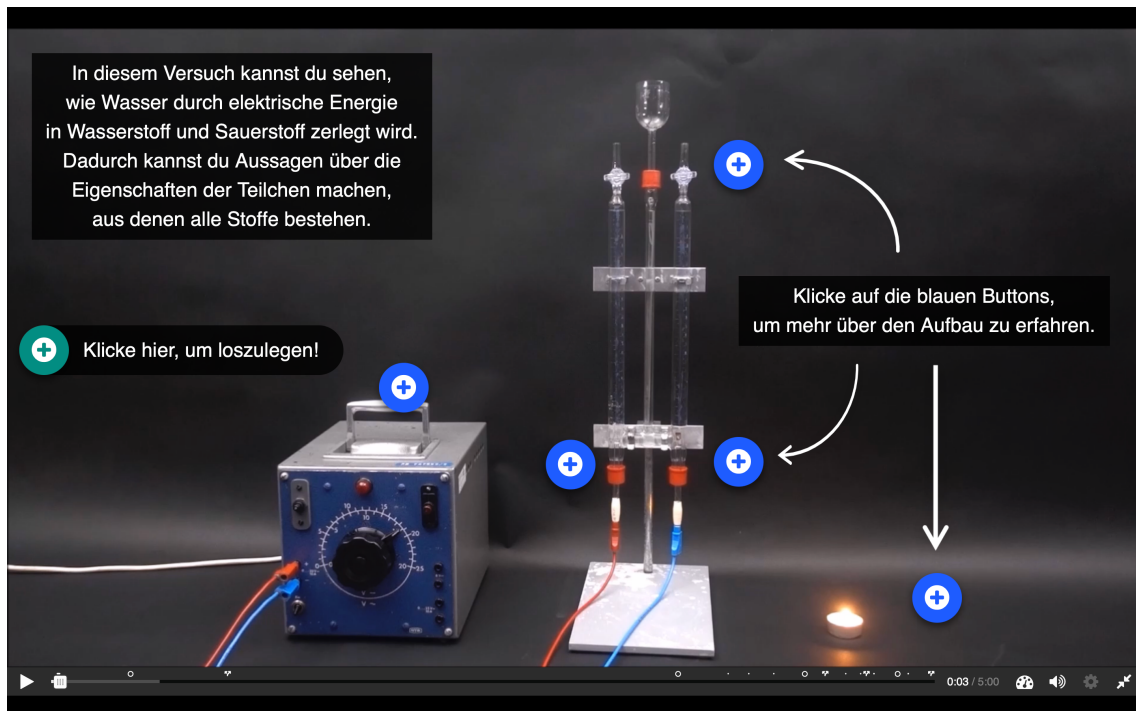


Abbildung 8: Bildschirmfoto aus dem interaktiven Experimentiervideo *Elektrolyse mit Knallgasreaktion*

In den Experimentiervideos soll die Möglichkeit bestehen, Vermutungen über den erwarteten Verlauf abgeben zu können. Aus dem Grund werden Abfragen eingebaut, die mehrere Antwortmöglichkeiten enthalten, die bei einer Auswahl weder als richtig noch als falsch bewertet werden. Auf diese Weise abgegebene Vermu-

tungen können dann im weiteren Verlauf mit den Beobachtungen im Experiment abgeglichen werden.

×

Was passiert nach dem Einfüllvorgang des Farbstoffs? Ziehe deine Vermutung in das freie Feld.

Die gefärbte Flüssigkeit wandert an die Oberfläche und lagert sich dort ab.

Die gefärbte Flüssigkeit setzt sich zunächst am Boden des Glases ab.

Die gefärbte Flüssigkeit vermischt sich unmittelbar mit dem Wasser und das gesamte Gemisch ist blau.

✓ Überprüfen

Abbildung 9: Interaktion *Hypothesenwahl* aus dem interaktiven Experimentiervideo *Farbstoff in Wasser*

Bei der abschließenden Auswertung wird jeweils der Bezug zu dem am Anfang formulierten Ziel des Experiments hergestellt und der Aspekt des Teilchenmodells, der durch die im Experiment gemachten Beobachtungen abgeleitet werden kann, deutlich vermittelt. Das geschieht sowohl durch Abfragen, die auf die im Experiment gemachten Beobachtungen eingehen, als auch durch Erklärtexte.

Bezogen auf die mediendidaktischen Aspekte der Experimentiervideos (s. Zeilen 5 – 7 in Tabelle 2) wird einerseits darauf geachtet, dass die Schüler*innen ein hohes Maß an Freiheit erhalten: Die Reihenfolge bestimmter Teile der Experimentiervideos ist frei wählbar, und diese können nach Bedarf mehrmals bearbeitet werden. Außerdem können für bestimmte Versuchsteile unterschiedliche Kameraperspektiven gewählt werden. Gleichzeitig wird durch verschiedene Aufgabenformate der

Fokus auf die relevanten Erkenntnisse aus den experimentellen Beobachtungen gelenkt.

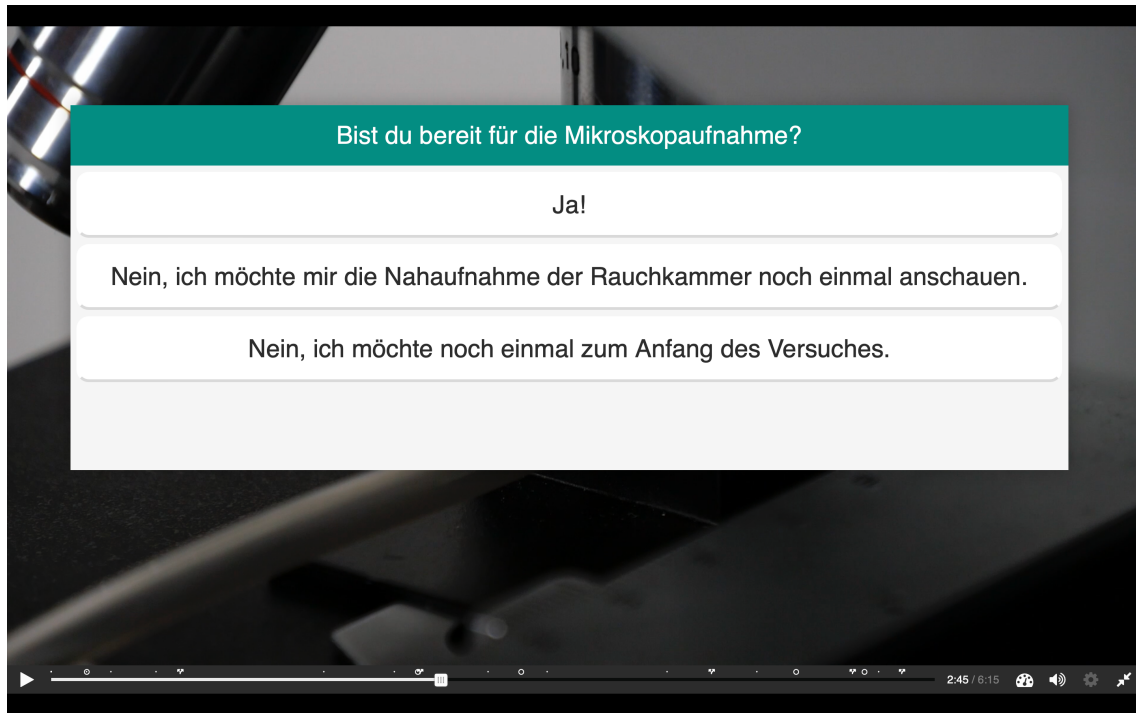


Abbildung 10: Bildschirmfoto aus dem interaktiven Experimentiervideo *Partikel in der Rauchkammer*

6 Methoden

Teile der in diesem Kapitel enthaltenen Inhalte, wie das verwendete Studiendesign und die quantitativen Ergebnisse der Pilotierung, wurden bereits veröffentlicht (s. Glatz, Teichrew, et al., 2021).

Da das Ziel dieses Forschungsprojektes eine vergleichende Analyse der Experimente zum Teilchenmodell in Bezug auf deren Überzeugungskraft ist, bietet sich ein Studiendesign mit Messwiederholung an, mit den Experimenten zum Teilchenmodell als unabhängige Variable (s. Abbildung 11 für eine schematische Übersicht des Erhebungsdesigns).

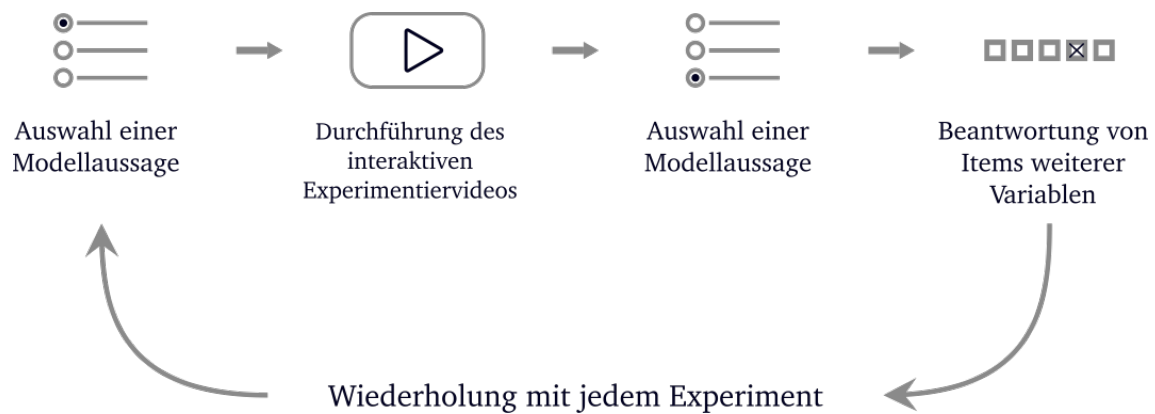


Abbildung 11: Schematische Übersicht der Intervention

Die Überzeugungskraft stellt zwar für jedes der Experimente die gleiche abhängige Variable dar, und alle Experimente vermitteln ein einheitliches Teilchenmodell, jedes Experiment hat jedoch einen anderen Fokus auf dieses Modell (s. Kapitel 5.3). Um diesen unterschiedlichen Aspekten des Teilchenmodells gerecht zu werden und dennoch die Überzeugungskraft der Experimente vergleichen zu können, wird den Schüler*innen vor und nach der Durchführung jedes Experiments eine vergleichbar strukturierte Auswahl an Aussagen zum Teilchenmodell präsentiert, die inhaltlich zu dem jeweiligen Experiment passen (s. Kapitel 6.2 für eine detaillierte Beschreibung). Die Schüler*innen können nach der Durchführung eines jeden Experiments also entscheiden, ob sie die vor der Experimentdurchführung getroffenen Aussagenauswahl wieder treffen, oder sich umentscheiden. Das dient als eine erste Einschätzung der Überzeugungskraft des jeweiligen Experiments.

Im Anschluss werden zusätzliche Variablen erhoben, die zum einen die Begründung für die Modellaussagenauswahl und zum anderen Merkmale der Experimentervideos betreffen. Dazu gehören die wahrgenommene inhaltliche Schwierigkeit eines jeden Experiments (ICL) sowie die Einschätzung der Versuchsaufbauten: von Materialien, die auch aus dem alltäglichen Gebrauch bekannt sind, bis hin zu Geräten, die aus einem unterrichtlichen oder wissenschaftlichen Kontext stammen.

Um zu messen, inwiefern die Intervention mit allen dazugehörigen Experimenten zu einer Verbesserung des Konzeptverständnisses zum Aufbau der Materie beiträgt, wird vor und nach deren Einsatz, also direkt zu Beginn der Erhebung und nachdem alle Experimente durchgeführt wurden, ein Vorstellungstest zum Aufbau der Materie eingesetzt.

6.1 Konzepttest zum Aufbau der Materie

Um das Konzeptverständnis zum Aufbau der Materie vor und nach dem Einsatz der Experimente zum Teilchenmodell zu messen, wird eine angepasste Form des Ordered Multiple Choice (OMC)-Tests von Hadenfeldt et al. (2016) eingesetzt. Das OMC-Testformat ist ein von Briggs et al. (2006, zitiert nach Hadenfeldt & Neumann, 2012) konzipiertes, welches bestimmte Vorteile offener Fragen mit denen von Multiple Choice (MC)-Aufgaben verbindet: Zum einen soll die Eigenschaft offener Fragen, neben Faktenwissen auch tiefgreifendes konzeptuelles Verständnis abzubilden, möglichst erhalten bleiben. Gleichzeitig soll aber auch die Reliabilität des Fragenkatalogs durch die Möglichkeit, eine große Anzahl an Items einsetzen zu können, erhöht werden (Hadenfeldt & Neumann, 2012).

Im Gegensatz zu gewöhnlichen Multiple Choice-Aufgaben bestehen OMC-Items aus mehreren Antwortoptionen, die nicht als lediglich „richtig“ oder „falsch“ kategorisiert werden. Zwar gibt es jeweils eine höchstgewertete Antwortoption, auch alle weiteren stellen jedoch Erklärungsmöglichkeiten für die Frage dar. Allerdings befinden sich diese auf niedrigeren Verständnisniveaus und enthalten auch Schülervorstellungen, die für das jeweilige Niveau typisch sind (s. Abbildung 12).

Die Verständnisniveaus sind aus der Theorie der Learning Progressions abgeleitet, die davon ausgeht, dass sich das Konzeptverständnis bestimmter Themen typischerweise entlang erwartbarer Trajektorien entwickelt (s. Kapitel 2.1.3). Die Antwortmöglichkeiten sind dementsprechend anhand typischer Schülervorstellungen

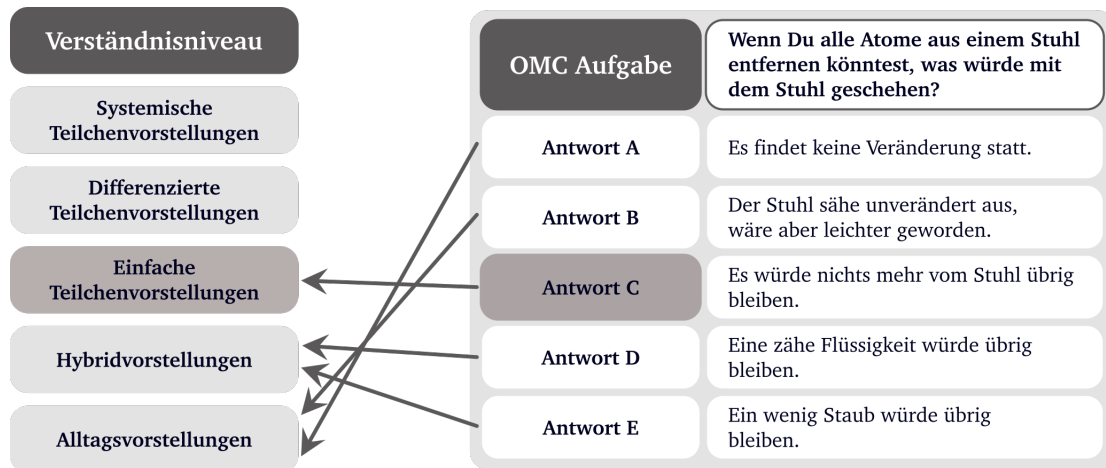


Abbildung 12: Beispiel eines OMC-Items nach Hadenfeldt et al. (2014)

entwickelt, die auf verschiedenen Niveaus anzutreffen sind. Schließlich verlangt dieses Testformat, dass anders als bei MC-Aufgaben die Distraktoren nicht gleich attraktiv, sondern für die niedrigeren Verständnisniveaus jeweils am plausibelsten erscheinen (Hadenfeldt & Neumann, 2012). Die Lautes Denken-Studie von Hadenfeldt et al. zeigt eine zufriedenstellende inhaltliche Validität der OMC-Items, insbesondere ab dem Niveau der neunten Jahrgangsstufe (Hadenfeldt et al., 2016), weshalb der Einsatz dieses Instruments für die vorliegende Erhebung in der daran angrenzenden achten Jahrgangsstufe als passend erachtet wird.

Der OMC-Test zum Aufbau der Materie enthält in seiner Originalform 44 Items, die in vier Subskalen unterteilt sind, die unterschiedliche inhaltliche Bereiche des Verständnisses zum Aufbau der Materie betreffen: *Struktur und Zusammensetzung*, *Physikalische Eigenschaften und Veränderungen*, *Chemische Reaktionen* und *Erhaltung* (Hadenfeldt & Neumann, 2012).

Für die vorliegende Studie werden drei der vier Subskalen eingesetzt, mit einer leichten Reduzierung der Itemanzahl, da sich diese inhaltlichen Schwerpunkte am besten in den ausgewählten Experimenten wiederfinden: *Struktur und Zusammensetzung* (12 Items), *Physikalische Eigenschaften und Veränderungen* (10 Items) und *Chemische Reaktionen* (6 Items). Da Forschungsergebnisse zeigen, dass diese vier Themenbereiche inhaltlich abgrenzbare Bereiche im Konzeptverständnis von Schüler*innen abbilden (Hadenfeldt et al., 2016), ist ein getrennter Einsatz der Subskalen auch zulässig.

6.2 Erhebung der Überzeugungskraft

Wie im theoretischen Teil dieser Arbeit beschrieben (s. Kapitel 2.3.1), soll die Überzeugungskraft der Experimente erhoben werden, operationalisiert durch die Akzeptanz ihrer Botschaften, also der Aspekte des Teilchenmodells, die sie vermitteln.

Dafür wird den Schüler*innen die Möglichkeit gegeben, sowohl vor als auch nach der Durchführung des jeweiligen Experiments anzugeben, mit welchen Aussagen zum Teilchenmodell sie übereinstimmen. In einer ersten Einschätzung können die Experimente als überzeugend beschrieben werden, die zu einem hohen Anteil dazu führen, dass Schüler*innen nach deren Durchführung mit der adäquaten Modellaussage übereinstimmen, insbesondere dann, wenn sie vor der Experimentdurchführung einer anderen Meinung waren.

Damit überprüft werden kann, inwiefern der auf diese Weise vollzogene Wechsel oder das Beibehalten einer Modellaussage aufgrund der Beobachtungen aus dem Experiment getroffen wird, werden im Anschluss zwei Skalen aus den Argumentkategorien von Ludwig (2017) verwendet. Diese sollen erheben, ob die Entscheidung hauptsächlich aufgrund emotionaler Beweggründe oder wegen sachlicher Beobachtungen aus dem Experiment geschehen ist.

6.2.1 Modellaussagenauswahl

Die Aussagen zum Teilchenmodell, die den Schüler*innen vor und nach der Experimentdurchführung zur Auswahl stehen, bestehen zum einen aus der Modellaussage, die aus fachlicher Sicht die adäquate ist und durch die Beobachtungen aus dem Experiment gestützt wird. Eine Übersicht der verwendeten Aussagen und der dazugehörigen Experimente sind in Tabelle 3 zu finden. Zudem werden jeweils zwei Alternativaussagen angeboten: eine, die den Teilchencharakter der Materie bestreitet und eine, die zwar einen diskreten Aufbau anerkennt, diesen aber mit unpassenden Beschreibungen versieht und sich dabei an gängigen Schülervorstellungen orientiert. Ein Beispiel dafür ist die Modellaussage, die ein Mischkonzept anspricht und besagt, dass Materie zwar aus Teilchen besteht, zwischen diesen Teilchen aber eine Substanz wie beispielsweise Wasser oder Luft ist (s. Tabelle 4 für weitere Beispiele).

Um sicherzustellen, dass die Modellaussagenauswahl nach dem Experiment als ein Beibehalten der gleichen Meinung oder ein Wechsel zu einer anderen Ansicht aufgefasst wird, bekommen die Schüler*innen die Wahl, die sie vor der Durchführung des Experimentiervideos getroffen haben, noch einmal angezeigt. Damit geht auch der Hinweis einher, dass sie die gleiche Modellaussage auswählen oder eine neue Wahl treffen können, je nachdem womit sie zu dem Zeitpunkt am ehesten übereinstimmen.

Dadurch soll eine Situation entstehen, in der die Schüler*innen eine begründete (Um-)Entscheidung treffen können und die einen Vergleich zu Einstellungsänderungen in Überzeugungssituationen zulässt, wie das in dem Elaboration Likelihood Model of Persuasion beschrieben wird (s. Kapitel 2.3.2). Damit wird also erhoben, inwiefern die Konfrontation mit Hinweisen, die für eine Modellaussage

Tabelle 3: Die acht Experimente mit dazugehörigen Aspekten des Teilchenmodells

Experiment	zu vermittelnder Aspekt des Teilchenmodells	
	Kürzel	(verkürzt)
1 Partikel in der Rauchkammer	RA	Teilchen sind in ständiger Bewegung.
2 Farbstoff in Wasser	FA	Ohne äußere Einflüsse verteilen sich Teilchen von Flüssigkeiten und Gasen gleichmäßig im Raum.
3 Bilden und Lösen von Salzkristallen	SK	Die Teilchen und deren Struktur untereinander bestimmen, welche erfahrbaren Eigenschaften die Materie hat.
4 Gesetz der konstanten Proportionen	KP	Chemische Verbindungen werden in bestimmten Verhältnissen eingegangen. Die Verhältnisse werden von den Eigenschaften der Teilchen der jeweiligen Stoffe bestimmt.
5 Ölfleckversuch	OL	Die Teilchen eines Stoffes haben eine bestimmte Mindestgröße.
6 Feldemissionsmikroskop	FE	Mit speziellen Mikroskopen kann man auf die Existenz von Teilchen schließen.
7 Elektrolyse mit Knallgasprobe	EK	Teilchen sind mit einer bestimmten Struktur untereinander angeordnet. Diese Struktur kann sich durch physikalische oder chemische Prozesse ändern.
8 Ei in Salzwasser	ES	Zwischen den Teilchen ist leerer Raum.

sprechen, in unserem Fall das durchgeführte Experiment, dazu führen, zu einer adäquaten Modellaussage zu wechseln. Solch ein Wechsel spräche dann für die Überzeugungskraft des Experiments.

Außerdem erhalten die Schüler*innen die Möglichkeit, nach jeder Wahl einer Modellaussage auf einer vierstufigen Skala von „gar nicht sicher“ bis „vollkommen sicher“ anzugeben, wie sicher sie sich mit ihrer eben getroffenen Wahl sind und dies schriftlich zu begründen. Das soll es erlauben, einen differenzierteren Blick auf die Ergebnisse der Modellaussagenauswahl zu werfen, insbesondere in den Fällen, in denen sowohl vor als auch nach dem Experiment die gleiche Wahl getroffen wird.

Tabelle 4: Alternative Modellaussagen und dazugehörige Experimente

Kürzel	Alternativaussage (inadäquate Eigenschaften)	Alternativaussage (Teilchen existieren nicht)
1 RA	Materie besteht aus kleinsten Teilchen. Diese haben immer einen festen Platz und bewegen sich nicht.	Materie besteht nicht immer aus kleinsten Teilchen. Je nach Stoff kann das unterschiedlich sein.
2 FA	Materie besteht aus kleinsten Teilchen. Wenn keine äußeren Einflüsse vorhanden sind, bleiben diese auch bei Flüssigkeiten und Gasen an der gleichen Stelle.	Materie besteht nicht aus kleinsten Teilchen, sondern ist auch submikroskopisch ein zusammenhängendes Ganzes.
3 SK	Materie besteht zwar aus kleinsten Teilchen, diese haben jedoch keinen Einfluss auf die erfahrbaren Eigenschaften der Materie (z. B. Geschmack, Geruch, Aussehen).	Materie besteht nicht aus Teilchen. Die Eigenschaften von Materie (z. B. Geschmack, Geruch, Aussehen) ergeben sich aus dem Gegenstand an sich.
4 KP	Stoffe bestehen aus kleinsten, nicht sichtbaren Teilchen. Wenn diese Stoffe chemische Verbindungen eingehen, so geschieht dies immer in zufälligen Verhältnissen.	Stoffe bestehen nicht aus kleinsten Teilchen. Verhältnisse in chemischen Verbindungen lassen sich nicht durch den Aufbau der Materie erklären.
5 OL	Materie besteht aus kleinsten, nicht sichtbaren Teilchen. Über die Größe der Teilchen kann man keine Aussage treffen.	Materie besteht nicht aus Teilchen. Sie ist zusammenhängend und lässt sich immer weiter teilen.
6 FE	Materie besteht aus kleinsten Teilchen. Mit dem Mikroskop kann man Teilchen direkt sehen.	Materie ist nicht aus kleinsten Teilchen aufgebaut. Mit einem speziellen Mikroskop sieht Materie zwar anders aus, das lässt aber keine Rückschlüsse auf deren Aufbau zu.

Tabelle 5: Alternative Modellaussagen und dazugehörige Experimente (Fortsetzung)

7 EK	Teilchen sind mit einer bestimmten Struktur untereinander angeordnet. Dies hat jedoch nichts mit dem Aussehen der Stoffe oder mit physikalischen/chemischen Prozessen zu tun.	Materie besteht nicht aus kleinsten Teilchen, sondern ist immer als ein zusammenhängendes Ganzes vorhanden.
8 ES	Materie ist aus kleinsten, nicht sichtbaren Teilchen aufgebaut. Je nach Stoff kann zwischen den Teilchen eine Substanz sein (zum Beispiel Luft oder Wasser).	Materie ist nicht aus Teilchen aufgebaut. Es ist immer ein zusammenhängendes Ganzes, das keine Freiräume in sich hat.

6.2.2 Argumente zur Begründung der Modellaussagenauswahl

Um Einblicke in die Gründe für das Beibehalten oder den Wechsel zu einer Modellaussage nach der Bearbeitung des jeweiligen Experiments zum Teilchenmodell zu gewinnen, werden sprachlich leicht angepasste Formen der zwei Skalen von Ludwig (2017) eingesetzt (s. Kapitel 2.3.2). Sie beruhen auf den zwei Argumentkategorien *Daten als Evidenz* und *Intuition* für das Beibehalten oder nicht Beibehalten einer auf ein Experiment bezogenen Hypothese (s. Tabelle 6, bzw. Tabelle 7).

Tabelle 6: Skala *Daten als Evidenz* von Ludwig (2017)

Items der Skala <i>Daten als Evidenz</i>	
1	Meine Messdaten sind der Grund, warum ich meine Vermutung verwerfe/beibehalte.
2	Meine Entscheidung, die Vermutung beizubehalten/zu verwerfen ist eine Reaktion auf die Messdaten.
3	Um für mich diese Entscheidung zum Beibehalten/Verwerfen meiner Vermutung zu begründen, denke ich besonders intensiv über die Messdaten nach.
4	Die Messdaten spielen bei meiner Entscheidung die größte Rolle.
5	Die Auswertung meiner Messdaten ist der Grund für meine Entscheidung zum Beibehalten/Wechseln meiner Vermutung.

Für eine bessere Passung dieser Items zu den eingesetzten interaktiven Experimentiervideos wird das Wort „Messdaten“ jeweils mit „Beobachtungen“ ersetzt. Deshalb wird die Skala auch im restlichen Teil dieser Arbeit „Skala *Beobachtungen*“ genannt.

Tabelle 7: Skala *Intuition* von Ludwig (2017)

Items der Skala <i>Intuition</i>	
1	Ich höre stark auf mein Bauchgefühl, wenn ich aus dem Experiment Schlüsse ziehe.
2	Bei der Entscheidung berücksichtige ich stark mein Gefühl.
3	Bei meiner Entscheidung spielen Gefühle eine große Rolle.
4	Ich habe mich gefühlsmäßig für die Antwort entschieden, die mir am meisten zusagt.
5	Bei der Entscheidung habe ich mich ganz auf mein Gefühl verlassen.

Durch die Bewertung dieser zwei Argumentkategorien in Bezug auf die getroffene Entscheidung des Wechsels/Beibehaltens einer Modellaussagenauswahl kann auf den Einfluss des jeweiligen Experiments auf diese Entscheidung geschlossen werden. Schneidet die Skala *Beobachtungen* besonders hoch ab, zum Beispiel, spricht das dafür, dass die Schüler*innen bei dieser Entscheidung den Beobachtungen aus dem Experiment eine vergleichsweise hohe Gewichtung gegeben haben. Analog zu den theoretischen Überlegungen des ELM spräche das dann für eine Verarbeitung der Informationen auf zentraler Route aufgrund der Berücksichtigung vornehmlich rationaler Faktoren. Ein vergleichsweise hohes Abschneiden der Skala *Intuition* hingegen spräche für eine stärkere Berücksichtigung anderer Faktoren und eine niedrigere Wahrscheinlichkeit, dass die getroffene Entscheidung mit einer langfristigen Einstellungsänderung einhergeht. Auf diesen Zusammenhang deuten auch die Ergebnisse von Ludwig (2017).

6.3 Erhebung von Merkmalen der Experimente

6.3.1 Inhaltliche Schwierigkeit

Für die Beschreibung der inhaltlichen Schwierigkeit der Experimente wird gemäß der Cognitive Load Theory der beanspruchte Intrinsic Cognitive Load betrachtet (s. Kapitel 2.2.2). Für dessen Messung wird in der vorliegenden Erhebung eine sprachlich angepasste Form der Items aus der Skala von Thees et al. (2020) genutzt, die auf den englischsprachigen Items von Leppink, Paas, Van der Vleuten, Van Gog & Van Merriënboer (2013) basieren. Sie wurden ebenfalls für einen Kontext

entwickelt, in dem Experimente mit digitalen Anteilen im Fokus stehen und erreichen zufriedenstellende Reliabilitätswerte.

Da im vorliegenden Studiendesign interaktive Experimentiervideos verwendet werden und nicht wie bei Thees et al. (2020) Augmented Reality-Experimente, sind die vier Items zum ICL sprachlich angepasst: „Aufnehmen der Messwerte“ wird durch „Deuten der Beobachtungen“ ersetzt und „die beim Experimentieren verwendeten Darstellungen“ durch „die Interaktionen beim Experimentieren“. Diese Items sind als fünfstufige Likert-Skala von „Stimme gar nicht zu“ bis „Stimme voll und ganz zu“ Teil der Erhebung (s. Tabelle 8).

Tabelle 8: Verwendete ICL-Items

	Übersetzte und angepasste Items von Thees et al. (2020)	Angepasste Items
1	Das Themengebiet des Experiments empfinde ich als sehr komplex.	Das Themengebiet des Experiments empfinde ich als sehr schwierig.
2	Das Aufnehmen der Messwerte habe ich als sehr komplex empfunden.	Das Deuten der Beobachtungen habe ich als sehr schwierig empfunden.
3	Die beim Experimentieren verwendeten Darstellungen habe ich als sehr komplex empfunden.	Die Interaktionen beim Experimentieren habe ich als sehr schwierig empfunden.
4	Die beim Experimentieren betrachteten physikalischen Zusammenhänge habe ich als sehr komplex empfunden.	Die beim Experimentieren betrachteten physikalischen/chemischen Zusammenhänge habe ich als sehr schwierig empfunden.

Durch die gleichbleibende Darstellungsform der Experimente als interaktive Videos (s. Kapitel 5.4), kann davon ausgegangen werden, dass der beanspruchte Extraneous Cognitive Load bei der Bearbeitung der verschiedenen Experimente auf konstantem Niveau bleibt. Aus diesem Grund wird bei der vorliegenden Studie auf die Erhebung des ECL verzichtet und lediglich der ICL gemessen.

Zusätzlich zum gemessenen ICL wird im Vorfeld der Erhebung eine Einschätzung der inhaltlichen Schwierigkeit der Experimente vorgenommen. Dies ist durch eine Einschätzung der erwarteten kognitiven Beanspruchung möglich, indem die inhaltlich interagierenden Elemente (element interactivity) betrachtet werden, die für eine angemessene Deutung der Experimente mitbeachtet werden müssen

(s. Kapitel 2.2.2). Ausgehend von einem geringen themenspezifischen Vorwissen (die Stichprobe umfasst Schüler*innen der achten Jahrgangsstufe), ergibt sich für die eingeschätzte inhaltliche Schwierigkeit folgende Rangfolge der Experimente:

Tabelle 9: Eingeschätzte kognitive Beanspruchung der Experimente in steigender Reihenfolge

Experiment	Eingeschätzte kognitive Beanspruchung
1 Partikel in der Rauchkammer	Niedrig
2 Farbstoff in Wasser	Niedrig
3 Feldemissionsmikroskop	Mittel
4 Bilden und Lösen von Salzkristallen	Mittel
5 Gesetz der konstanten Proportionen	Mittel
6 Elektrolyse mit Knallgasprobe	Hoch
7 Ei in Salzwasser	Hoch
8 Ölfleckversuch	Hoch

Unterscheidbar sind dabei die Experimente, bei denen aufgrund vieler prozeduraler Schritte mit einer erhöhten kognitiven Beanspruchung zu rechnen ist, und jene Experimente, die zwar keine komplexe Durchführung beinhalten, eine angemessene Übertragung der Beobachtungen auf das Teilchenmodell aber eine hohe Anzahl an Denkschritten erfordert. Ein Beispiel des letzteren Falls ist das Experiment *Ei in Salzwasser*. Auch wenn die durchgeführten Schritte äußerst einfach nachzuvollziehen sind, ist die Interpretation der Beobachtungen vergleichsweise komplex, denn es muss ein Verständnis von Dichte und dessen Bedeutung sowohl für das makroskopische Phänomen als auch für die nicht sichtbare Teilchenebene vorhanden sein. Das Feldemissionsmikroskop kann als gegenteiliger Fall gesehen werden: Während die Versuchsdurchführung viele nicht leicht nachvollziehbare Schritte beinhaltet, um das erwünschte Bild auf dem Glaskolben erscheinen zu lassen, so ist der Rückschluss auf einen strukturierten Aufbau der Materie vergleichsweise einfach, da er lediglich die Interpretation eines optischen Bildes erfordert (s. Kapitel 5.3 für eine inhaltliche Beschreibung der Experimente).

6.3.2 Komplexität des Aufbaus

Die Einschätzung des Aufbaus der Experimente orientiert sich an zwei Anhaltspunkten. Zum einen gibt es die Experimente, die vornehmlich einen Aufbau bestehend aus alltäglichen Gegenständen besitzen und zum anderen jene Experimente, deren Aufbauten eher in einem wissenschaftlichen oder zumindest unterrichtlichen Kontext anzutreffen sind. Die Annahme lautet, dass Experimente, die vor allem aus Gegenständen und Geräte bestehen, die typischerweise nur in einem Labor Verwendung finden, als komplexer wahrgenommen werden. Schließlich sind sie dann für Schüler*innen neuartig und erscheinen in einer ungewohnten Situation oder in ungewohnten Kombinationen. Zusätzlich ist davon auszugehen, dass die Anzahl der Gegenstände oder Geräte die Komplexität weiter erhöht. Außerdem gibt es bei Laborgeräten die Unterscheidung zwischen Geräten, die einen anschaulichen Charakter haben (z. B. der Hofmannsche Wasserzersetzungssapparat) und solche, bei denen wenig direkt beobachtbar ist (z. B. ein Netzgerät).

Mit alltäglichen Geräten sind in diesem Fall keine Freihand- oder Low Cost-Experimente gemeint, die zum Ziel haben, möglichst einfache Gegenstände zu verwenden, die im Alltag häufig anzutreffen sind. Stattdessen werden hier solche Gegenstände bezeichnet, von denen erwartbar ist, dass ihre Verwendung auch im Alltag vorkommt und man sie intuitiv verstehen kann. Eine Petrischale beispielsweise zählt hier zu den alltäglichen Geräten, auch wenn sie strikt gesehen nur in Laborumgebungen verwendet wird. Unter Berücksichtigung dieser Aspekte entsteht für die Einschätzung der Komplexität des Aufbaus die weiter unten stehende Rangfolge der acht Experimente zum Teilchenmodell⁷ (s. Tabelle 10).

Zusätzlich zu dieser im Vorfeld getroffenen Einschätzung der Experimente wird im Rahmen der Erhebung auch die Wahrnehmung des Aufbaus mit zwei Einzeldikatoren auf einer fünfstufigen Skala bei den Schüler*innen erhoben. Dabei wird nach einer Einschätzung der Experimente in Bezug auf die verwendeten Geräteearten gefragt (s. Tabelle 11).

⁷ Bei der Festlegung der Rangfolge werden die Art und Anzahl der Laborgeräte stärker gewichtet als die Anzahl der Geräte insgesamt

Tabelle 10: Einschätzte Komplexität des Aufbaus in steigender Reihenfolge

Experiment	Anzahl verwendeter Geräte	
	Alltäglich	Labor
1 Farbstoff in Wasser	4	0
2 Ei in Salzwasser	5	0
3 Bilden und Lösen von Salzkristallen	4	1
4 Ölfleckversuch	2	3
5 Gesetz der konstanten Proportionen	0	2
6 Elektrolyse mit Knallgasprobe	1	3
7 Partikel in der Rauchkammer	3	4
8 Feldemissionsmikroskop	0	6

Tabelle 11: Items zum wahrgenommenen Aufbau der Experimente

Items zum Aufbau der Experimente
1 Bei dem Experiment wurden überwiegend Gegenstände verwendet, die ich aus meinem Alltag kenne.
2 Die Geräte, die im Experiment benutzt wurden, gibt es überwiegend an einer Schule oder Universität.

6.3.3 Wahrgenommene System Usability

Auch wenn die Erhebung der System Usability typischerweise im Bereich der Verbraucherforschung und Produktentwicklung eingesetzt wird, findet sie auch in der Fachdidaktik Anwendung, wenn neuartige digitale Inhalte eingesetzt werden und deren Bedienbarkeit beurteilt werden soll (z. B. Thees et al., 2020).

Da in der vorliegenden Studie die Experimente in Form von interaktiven Experimentiervideos eingesetzt werden, soll auch hier eine Einschätzung der durch die Schüler*innen wahrgenommenen Benutzungsfreundlichkeit vorgenommen werden. Die interaktiven Experimentiervideos wurden auf dieselbe, einheitliche Art erstellt, weshalb nicht davon auszugehen ist, dass sich die System Usability des

Mediums von Experiment zu Experiment unterscheidet. Dementsprechend wird sie nur am Ende der gesamten Intervention erhoben, nachdem alle Experimentiervideos durchgeführt wurden.

Als Messinstrument wird die System Usability Scale (SUS)⁸ von Brooke (1996) nach eigener Übersetzung eingesetzt (s. Tabelle 12). Dabei wird „System“ mit „digitales Medium“ übersetzt, um besser zu dem Szenario dieser Erhebung zu passen. Vor dem Einsatz dieser Skala erhalten die Schüler*innen den Hinweis, dass damit die interaktiven Experimentiervideos im Allgemeinen gemeint sind, unabhängig von ihrem Inhalt.

Als Ergebnis dieser Skala kann ein Wert zwischen 0 und 100 erreicht werden. Für die Einschätzung eines solchen Wertes kann die Adjective Rating Scale von Bangor, Kortum & Miller (2009) hinzugezogen werden, da sie eine intuitive Interpretation des Ergebnisses zulässt (s. Abbildung 13).

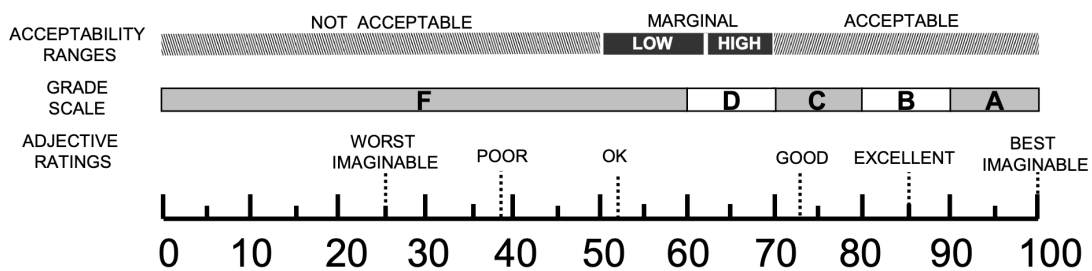


Abbildung 13: Verschiedene Ratingskalen zum SUS nach Bangor et al. (2009)

Die Korrelationsanalyse von Bangor et al. (ebd.) zeigt zwar eine hohe Übereinstimmung ($r = .822$) mit Ergebnissen der System Usability Scale von Brooke (1996), die Autoren weisen jedoch bei der Interpretation des mittleren Skalenbereichs „OK“ darauf hin, dass dieses Wort in seiner Bedeutung zu variabel ist und oft eine vorteilhaftere Konnotation trägt, als hier gemeint ist (Bangor et al., 2009). Fällt die Beurteilung eines Produkts also in diesen Bereich, soll nicht der Eindruck entstehen, weitere Verbesserungen seien unnötig.

⁸ Genau genommen dient die Skala der Erhebung der User Satisfaction, ein Teilkonstrukt der System Usability. Da im Rahmen dieser Arbeit jedoch kein großangelegter System Usability Test durchgeführt wird, der weitere Konstrukte beinhaltet, wird hier der Überbegriff System Usability verwendet.

Tabelle 12: SUS in original und verwendeter Übersetzung.

Original-Items	Eigene Übersetzung
1 I think that I would like to use this system frequently.	Ich glaube ich würde dieses digitale Medium gerne häufig verwenden.
2 I found the system unnecessarily complex.	Ich empfand das digitale Medium als unnötig komplex.
3 I thought the system was easy to use.	Ich finde das digitale Medium war leicht zu bedienen.
4 I think that I would need the support of a technical person to be able to use this system.	Ich glaube ich würde die Unterstützung von einer technisch erfahrenen Person brauchen, um dieses digitale Medium benutzen zu können.
5 I found the various functions in this system were well-integrated.	Ich fand die verschiedenen Funktionen dieses digitalen Mediums gut integriert.
6 I thought there was too much inconsistency in this system.	Ich finde in dem digitalen Medium gab es zu viele Unstimmigkeiten.
7 I would imagine that most people would learn to use this system very quickly.	Ich denke, dass die meisten Leute sehr schnell lernen würden, dieses digitale Medium zu benutzen.
8 I found the system very cumbersome to use.	Ich empfand das digitale Medium als sehr mühselig zu bedienen.
9 I felt very confident using the system.	Ich habe mich in der Bedienung des digitalen Mediums sehr sicher gefühlt
10 I needed to learn a lot of things before I could get going with the system.	Ich musste viele Dinge lernen, bevor ich mit dem digitalen Medium loslegen konnte.

6.4 Forschungshypothesen

Mit dem hier vorgestellten Studiendesign und den dazugehörigen Messinstrumenten werden auf Grundlage der in Kapitel 5.1 festgehaltenen Forschungsfragen folgende Hypothesen formuliert.

Hypothese 1: Das Konzeptverständnis der Schüler*innen zum Aufbau der Materie entwickelt sich nach der Bearbeitung der ausgewählten Experimente im Mittel positiv.

Trotz der kurzen Intervention, die innerhalb eines zweiwöchigen Zeitraums stattfindet, wird erwartet, dass sich das Konzeptverständnis der Schüler*innen zum Aufbau der Materie, gemessen mit dem OMC-Messinstrument, positiv entwickelt. Auch wenn sich durch diesen Test allein keine langfristigen Konzeptentwicklungen prognostizieren lassen, wird dies wegen der inhaltlichen Übereinstimmung zwischen Testinstrument und inhaltlichem Fokus der Experimente erwartet.

Hypothese 2.1: Die Überzeugungskraft der ausgewählten Experimente unterscheidet sich.

Diese unterschiedliche Überzeugungskraft, gemessen durch die Anzahl der Schüler*innen, die von einer falschen Modellaussage zu der richtigen wechseln, wird aufgrund der Unterschiedlichkeit der Experimente erwartet. Obwohl alle Experimente das gleiche Teilchenmodell vermitteln, wird dies mit jeweils unterschiedlichem Fokus getan. Außerdem unterscheiden sich die Experimente in ihrem materiellen Aufbau und in der für eine adäquate Durchführung erwartbaren kognitiven Beanspruchung.

Hypothese 2.2: Bei überzeugenden Experimenten wird die korrekte Modellaussagenauswahl mit höherer Sicherheit angegeben als bei den weniger überzeugenden Experimenten.

Diese Hypothese formuliert die Erwartung, dass sich die Überzeugungskraft nicht nur durch die Häufigkeit eines Wechsels zur korrekten Modellaussagenauswahl erkennbar macht, sondern auch durch eine höhere angegebene Sicherheit mit der korrekten Modellaussagenauswahl.

Hypothese 2.3: Bei Experimenten, die als überzeugender abschneiden, wird dies stärker mit den Beobachtungen aus den Experimenten begründet als bei den restlichen.

Hypothese 2.4: Experimente mit einer höheren inhaltlichen Schwierigkeit führen seltener zu einem Wechsel zur richtigen Modellaussage.

Hypothese 2.5: Experimente, die als inhaltlich schwieriger wahrgenommen werden, führen seltener zu einem Wechsel zur richtigen Modellaussage.

Diese zwei Hypothesen berücksichtigen die verschiedenen Arten der Bestimmung der inhaltlichen Schwierigkeit der Experimente (s. Kapitel 6.3.1). H2.4 bezieht sich auf die im Vorfeld bestimmte inhaltliche Schwierigkeit der Experimente, während sich H2.5 auf den gemessenen ICL bezieht.

Hypothese 2.6: Die Experimente, deren Aufbau aus vornehmlich alltäglichen Gegenständen besteht, werden als überzeugender wahrgenommen.

6.5 Pilotierung

6.5.1 Methoden und Stichprobe

Das geplante Studiendesign wurde mit einer Stichprobe bestehend aus zwei hessischen Gymnasialklassen der neunten Jahrgangsstufe ($n = 47$) pilotiert. Aus den acht Experimenten zum Teilchenmodell wurden dafür vier ausgewählt, die unterschiedliche Merkmale aufweisen und damit repräsentativ für die gesamte Experimentauswahl sind (s. Tabelle 13).

Tabelle 13: Die vier in der Pilotierung eingesetzten Experimente

Experiment	Erwartete kognitive Beanspruchung	Aufbau
1 Partikel in der Rauchkammer	Niedrig	Vorwiegend Laborgeräte
2 Elektrolyse mit Knallgasprobe	Hoch	Vorwiegend Laborgeräte
3 Ei in Salzwasser	Hoch	Vorwiegend alltäglich
4 Farbstoff in Wasser	Niedrig	Vorwiegend alltäglich

Während der Erhebung wurden acht einzelne Schüler*innen während ihrer Bearbeitung des interaktiven Experimentiervideos und des dazugehörigen Fragebogens durch Interviews begleitet. Während die Schüler*innen das interaktive Video in Stille bearbeiteten, wurde während der Bearbeitung des Fragebogens die Methode

des Lauten Denkens angewandt. Anschließend fand ein retrospektives Interview zum durchgeführten interaktiven Experimentiervideo und den Modellaussagenauswahlen statt. Ziel dieses gesamten qualitativen Anteils war, eine inhaltliche Validierung der geplanten Erhebung vorzunehmen.

6.5.2 Ergebnisse der quantitativen Anteile

Aufgrund der Struktur des OMC-Tests zum Konzeptverständnis zum Aufbau der Materie (s. Kapitel 6.1) können die Proband*innen der Stichprobe einen Wert zwischen 28 und 94 Punkten erreichen. Der durchschnittliche erreichte Wert des Pretests beträgt 69.5 (SD = 7.4), während der des Posttests 66.3 (SD = 8.1) beträgt. Die Ergebnisse eines t-Tests für gepaarte Stichproben (s. Kapitel 7 für eine Erklärung dieses Testverfahrens) zeigen einen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Werten: $t(45) = -2.929, p = .005, d = 0.43$.

Die Modellaussagenauswahl vor und nach jedem Experiment ist in folgendem Säulendiagramm aufgeführt.

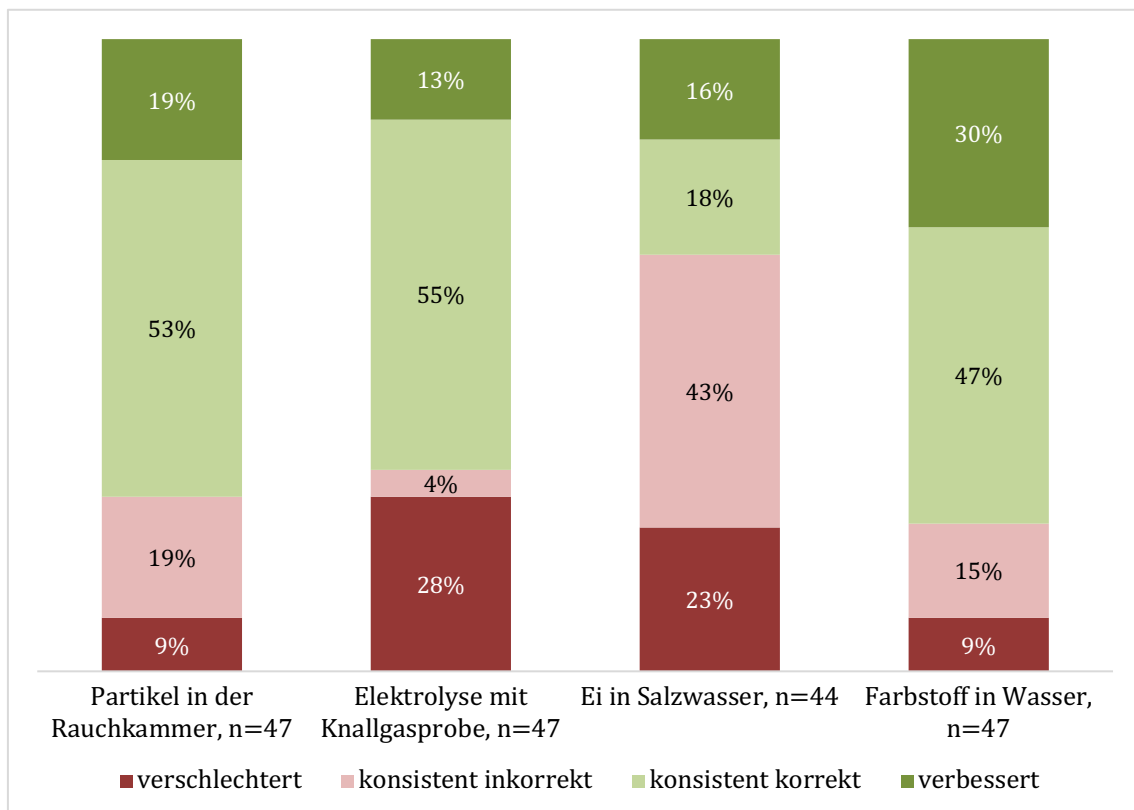


Abbildung 14: Prozentuale Verteilung der Entwicklungen der Modellaussagenauswahlen in der Pilotierung

Die dunkelgrünen Säulenabschnitte stellen die Anteile der Schüler*innen dar, die vor der Durchführung des Experiments eine inkorrekte Modellaussage gewählt haben und nach dem Experiment die korrekte. Der gegenteilige Fall, also eine korrekte Auswahl vor dem Experiment und eine inkorrekte danach, wird durch den dunkelroten Säulenteil dargestellt. Die hellgrünen bzw. hellroten Säulenabschnitte stellen den Anteil der Schüler*innen dar, die sowohl vor als auch nach der Experimentdurchführung die korrekte, bzw. eine Alternativaussage gewählt haben.

Da die Schüler*innen alle der vier Treatments durchlaufen (also alle vier Experimente durchführen), wird für die Prüfung auf Signifikanzunterschiede zwischen den Ergebnissen der Skalen, die nach jedem Experiment eingesetzt werden, jeweils eine ANOVA mit Messwiederholung durchgeführt (s. Kapitel 7 für eine detailliertere Erklärung dieses Testverfahrens).

Tabelle 14: Deskriptive Statistiken der abhängigen Variable *Beobachtungen* (n = 42) in steigender Reihenfolge

Experiment	M	SD
Elektrolyse mit Knallgasreaktion	3.58	.86
Partikel in der Rauchkammer	3.65	.84
Ei in Salzwasser	3.68	.74
Farbstoff in Wasser	3.83	.71

Die Ergebnisse der ANOVAs mit Messwiederholung zeigen keine signifikanten Mittelwertunterschiede der zwei Skalen der Argumentkategorie *Beobachtungen* $F(3, 123) = 1.35, p = .261$ bzw. *Intuition* $F(3, 123) = 1.35, p = .262$ zwischen den vier Experimenten.

Tabelle 15: Deskriptive Statistiken der abhängigen Variable *Intuition* (n = 42) in steigender Reihenfolge

Experiment	M	SD
Partikel in der Rauchkammer	2.55	.83
Farbstoff in Wasser	2.62	.95
Ei in Salzwasser	2.70	.92
Elektrolyse mit Knallgasreaktion	2.78	.98

Das Ergebnis des gemessenen ICL der Experimente zeigt folgende Rangfolge:

Tabelle 16: Deskriptive Statistiken der abhängigen Variable *ICL*
(n = 41) in steigender Reihenfolge

Experiment	M	SD
Farbstoff in Wasser	2.68	.96
Partikel in der Rauchkammer	2.71	.88
Elektrolyse mit Knallgasreaktion	2.79	.89
Ei in Salzwasser	2.88	.81

Die Unterschiede zwischen den ICL-Werten befinden sich jedoch auf keinem statistisch signifikantem Niveau, wie die nach Greenhouse-Geisser korrigierte A-NOVA mit Messwiederholung zeigt $F(2.51, 100.52) = .76, p = .496$.

Die Bewertung der System Usability der vier interaktiven Experimentiervideos erreicht einen Mittelwert von 68.7, was nach der Skala von Bangor et al. (2009) in den Bereich von „OK“ fällt (s Kapitel 6.3.3 für Hinweise zur Einordnung von System Usability Scores).

6.5.3 Ergebnisse der qualitativen Anteile

Die Datenerhebung der qualitativen Anteile und deren Auswertung waren Teil einer wissenschaftlichen Hausarbeit an der Goethe-Universität Frankfurt⁹. An dieser Stelle wird lediglich auf die für die vorliegende Studie relevanten Ergebnisse eingegangen.

Die Analyse der Äußerungen der Schüler*innen, die in der Phase des Lauten Denkens während der Modellaussagenauswahlen getroffen wurden, zeigt eine starke inhaltliche Deckung mit den im Fragebogen gemachten Angaben. Insbesondere wenn die Freitextangaben mitberücksichtigt werden, die als Begründung der Sicherheit mit den getroffenen Auswahlen einhergehen, kann von einer hohen inhaltlichen Validität dieses Fragebogenteils ausgegangen werden. Es ist also davon

⁹ Reiter, V. (2022). Validierung einer Befragung zur Struktur der Materie mit der Methode des lautten Denkens (Wissenschaftliche Hausarbeit). Goethe-Universität Frankfurt.

auszugehen, dass die Aussagen zum Teilchenmodell, die diese vier Experimente begleiten, für Schüler*innen verständlich sind.

Wie in den Transkripten der retrospektiven Interviews, der Lautes Denken-Phase und aus den Bildschirmaufzeichnungen zu erkennen ist, werden die interaktiven Experimentiervideos von den Schüler*innen positiv aufgenommen und sind im Allgemeinen gut verständlich. Es zeigt sich jedoch, dass vor allem bei der Durchführung des jeweils ersten interaktiven Experimentiervideos Schwierigkeiten auftreten können. Dies betrifft insbesondere die Bedienung der Interaktionen, die anfänglich oft übersehen oder ignoriert werden. Ein Verständnis für die verschiedenen Funktionen scheint sich erst im Laufe der ersten Durchführung aufzubauen.

6.5.4 Interpretation der Ergebnisse der quantitativen Anteile

Eine mögliche Erklärung für das signifikant niedrigere Ergebnis des Konzepttests am Ende der Intervention sind die bereits hohen Ergebnisse des Pretests, die eine Verbesserung im Posttest erschweren. Außerdem kann die praktische Umsetzung der Pilotierung dafür mitverantwortlich sein: Der Posttest wurde am Ende des zweiten Termins durchgeführt, direkt nach der Durchführung von zwei der vier interaktiven Experimentiervideos. Ermüdungseffekte können deshalb nicht ausgeschlossen werden.

Ein Vergleich der Experimente gemessen an den Entwicklungen der Modellaussagenauswahl zeigt eine höhere Überzeugungskraft der zwei Experimente *Partikel in der Rauchkammer* und *Farbstoff in Wasser*. Besonders auffällig sind die relativ großen Anteile an Schüler*innen, die nach der Durchführung des Experiments *Elektrolyse mit Knallgasprobe* zu einer falschen Aussage gewechselt haben und die nach dem Experiment *Ei in Salzwasser* bei einer inkorrekten Modellaussage geblieben sind. Beide diese Experimente sind laut der im Vorfeld durchgeführten Einschätzung die zwei inhaltlich schwierigeren Experimente (s. Tabelle 13), was sich auch mit der Rangfolge deckt, die sich aus den Werten des gemessenen ICL ergibt (s. Tabelle 16). Mit Blick auf die Entwicklungen der Modellaussagenauswahlen lässt dies die Interpretation zu, dass die inhaltlich schwierigeren Experimente als weniger überzeugend wahrgenommen werden.

Die Beeinflussung der unterschiedlichen Modellaussagen kann dabei jedoch auch nicht ausgeschlossen werden. Im Falle des Experiments *Ei in Salzwasser* wird zum Beispiel in einer Alternativaussage eine gängige Schülervorstellung angesprochen,

die nicht leicht abzulegen ist: „Je nach Stoff kann zwischen den Teilchen eine Substanz sein (zum Beispiel Luft oder Wasser).“ Selbst nach Durchführung des Experiments, das das Gegenteil nahelegt, ist diese Aussage für einen großen Teil der Schüler*innen immer noch am attraktivsten.

Einen Einfluss der verwendeten Gerätearten auf die Verteilung der Modellaussagenauswahl lässt sich in den vorliegenden Ergebnissen nicht erkennen. Sowohl bei den zwei überzeugenderen Experimenten als auch bei den anderen zwei ist jeweils ein Experiment mit vorwiegend alltäglichen Geräten und eines mit Laborgeräten enthalten.

Die Ergebnisse der zwei Skalen, die auf die Gründe für einen Wechsel oder das Beibehalten einer Modellaussagenauswahl eingehen, zeigen, dass die Schüler*innen eher die Beobachtungen aus den Experimenten dafür berücksichtigen. Unterschiede zwischen den Experimenten lassen sich jedoch nicht erkennen.

6.5.5 Anpassungen der Hauptstudie

Die Ergebnisse der Pilotierung zeigen erkennbare Unterschiede in der Überzeugungskraft der vier Experimente. Dementsprechend ist ein genauerer Blick auf die gesamte Auswahl an acht Experimenten in der Haupterhebung von Interesse.

Um möglichen Ermüdungseffekten vorzubeugen, wird der Konzepttest nicht mehr am Ende des letzten Termins durchgeführt, an dem auch interaktive Experimentiervideos bearbeitet werden. Stattdessen wird der nächste Unterrichtstermin in der darauffolgenden Woche dafür genutzt. Diese zusätzliche Zeit, die zwischen Versuchsdurchführungen und Konzepttest vergeht, hat auch den Vorteil, dass die Schüler*innen den Test nicht lediglich anhand unmittelbarer Eindrücke der eben durchgeführten Experimente ausfüllen.

Die Ergebnisse des System Usability-Tests platzieren die interaktiven Experimentiervideos auf der Skala von Bangor et al. (2009) in den oberen Bereich des Abschnittes „OK“. Für die Hauptstudie wird eine Verbesserung dieses Scores angestrebt, am besten in den Bereich von „Gut“, mindestens aber über einen Wert von 70 (s. Abbildung 13 für eine Einordnung von SU-Scores). Die Ergebnisse der qualitativen Erhebung zeigen überwiegend positive Reaktionen der Schüler*innen auf die interaktiven Experimentiervideos, zeigen aber auch Bedienungsschwierigkeiten auf, vor allem bei der jeweils erstmaligen Durchführung. Bei der Überarbeitung

der interaktiven Experimentiervideos für die Hauptstudie wird deshalb darauf geachtet, übersichtlichere Hinweise zur Durchführung des Videos und der Bedienungsmöglichkeiten einzublenden. Ein konkretes Beispiel sind die in Abbildung 8 erkennbaren Pfeile, die auf die klickbaren Buttons aufmerksam machen, hinter denen sich weitere Interaktionsmöglichkeiten befinden.

Da in der Hauptstudie doppelt so viele interaktive Experimentiervideos eingesetzt werden, wird außerdem noch stärker auf eine übersichtliche Führung durch den Fragebogen geachtet, damit die Schüler*innen in ihrer Orientierung unterstützt werden.

6.6 Stichprobe und praktische Umsetzung der Hauptstudie

Die acht überarbeiteten interaktiven Experimentiervideos zum Teilchenmodell werden im Rahmen der Haupterhebung in fünf Gymnasialklassen der achten Jahrgangsstufe in zwei hessischen Schulen eingesetzt ($N = 153$). Die Erhebung findet an drei Unterrichtsterminen statt und nimmt jeweils eine gesamte Doppelstunde (90 Minuten) in Anspruch, mit Ausnahme des letzten Termins, an dem nur der Post-Test ausgefüllt wird. Drei der fünf Klassen arbeiten an den in den Schulen zur Verfügung stehenden Computern der PC-Räume, während zwei Klassen in ihren gewohnten Räumen die Erhebung an bereitgestellten und eigenen Tablets durchführen. Diese synchrone Durchführung im Klassenverbund soll sicherstellen, dass die Schüler*innen möglichst ablenkungsarm und unter gleichen Bedingungen arbeiten können.

Die Erhebung wird vollständig digital durchgeführt. Das hat den Vorteil, dass die interaktiven Experimentiervideos optimal in die dazugehörigen Fragebogenanteile eingebettet werden können.

Um mögliche Sequenzeffekte zu vermeiden, wird die Reihenfolge der Experimente im Fragebogen durch eine blinde Wahl zufällig gemischt. Die Anzahl der Experimente, die die Schüler*innen zu einem Termin zwingend bearbeiten sollen, ist ebenfalls nicht vorgegeben, um möglichst keinen zeitlichen Druck zu erzeugen.

7 Ergebnisse

Teile der in diesem Kapitel vorgestellten Ergebnisse wurden bereits veröffentlicht (s. Glatz, Erb & Teichrew, 2023).

Die Ergebnisse der Erhebung werden zum einen qualitativ betrachtet, insbesondere in der Diskussion zu den Entwicklungen der Modellaussagenauswahlen. Für die Auswertung der Ergebnisse eingesetzter Testskalen werden außerdem die weiter unten beschriebenen Auswertemethoden verwendet.

t-Tests und Varianzanalysen

Für die statistische Überprüfung von Unterschiedshypothesen bieten sich zwei Verfahrensarten an: der t-Test und die Varianzanalyse (Döring, 2023). Der wohl bedeutendste Unterschied zwischen diesen Verfahrensarten ist, dass t-Tests für die Signifikanzprüfung von Mittelwertunterschieden zwischen nur zwei Gruppen verwendet werden können (typischerweise eine behandelte Treatment-Gruppe und eine unbehandelte Kontrollgruppe), während Varianzanalysen auch für den Vergleich von drei oder mehr Gruppen geeignet sind.

Für die Einschätzung der Signifikanz wird der von Statistikprogrammen¹⁰ berechnete Wert der Irrtumswahrscheinlichkeit p verwendet. Dieser bezeichnet die Wahrscheinlichkeit des Stichprobenergebnisses unter der Annahme, dass in der Population, aus der die Stichprobe stammt, kein Effekt vorliegt (d. h. die Nullhypothese gilt). Ein Ergebnis ist also dann signifikant, wenn das Ergebnis von p unter einem festgelegten Niveau liegt (ebd.). Dieses Signifikanzniveau ist in der Forschungsstatistik typischerweise auf $\alpha = 5\%$ festgelegt (ebd.) und wird auch in der Datenauswertung dieser Studie verwendet.

Werden nicht zwei verschiedene Gruppen untersucht, sondern dieselbe Stichprobe beiden Versuchsbedingungen ausgesetzt, können Mittelwertunterschiede der abhängigen Variable durch Einsatz eines abhängigen t-Tests auf Signifikanz geprüft werden. Solch ein Design liegt hier im Falle des Pre-/Posttestes vor, mit dem Konzeptwissen als abhängige Variable und den Messzeitpunkten (einmal vor und einmal nach der gesamten Intervention) als unabhängige Variable.

¹⁰ In der vorliegenden Arbeit wird für die Auswertung das Statistikprogramm IBM SPSS v. 29.0.2.0 verwendet

Wird ein Einfluss einer mehr als zweifach gestuften unabhängigen Variable auf eine abhängige Variable erwartet, dann kann als Signifikanzprüfung eine Varianzanalyse (ANOVA – *Analysis of Variance*) verwendet werden. Diese testet, ob sich mindestens zwei der Mittelwerte signifikant unterscheiden. Werden die Messungen der abhängigen Variable an derselben Stichprobe durchgeführt, durchlaufen also alle Teilnehmer*innen alle Versuchsbedingungen, wird eine spezielle Form der Varianzanalyse eingesetzt, und zwar die ANOVA mit Messwiederholung (rmANOVA – *repeated measures ANOVA*) (Field, 2013). Dies trifft auch auf das vorliegende Studiendesign zu: alle teilnehmenden Schüler*innen durchlaufen alle Versuchsbedingungen (die Experimente zum Teilchenmodell).

Ausgewählte Fälle

Für die Betrachtung der Ergebnisse der experimentbegleitenden Fragebögen ist in diesem Studiendesign relevant, ob die Schüler*innen das jeweilige interaktive Experimentiervideo aufmerksam und vollständig bearbeitet haben. Da die Schüler*innen die Experimentiervideos jedoch selbständig und in individueller Reihenfolge und Bearbeitungszeit durchgeführt haben und von der Erhebung keine Bildschirmaufzeichnungen vorliegen, ist die einzige Variable, anhand derer sich eine mehr oder weniger aufmerksame Bearbeitung abschätzen lässt, die Zeit, die auf der Browserseite des jeweiligen interaktiven Experimentiervideos verbracht wurde. Diese wurde in der Datenaufbereitung mit der Mindestzeit verglichen, die für eine erfolgreiche Durchführung eines interaktiven Experimentiervideos benötigt wird. Für die Bestimmung der Mindestzeit wurde jedes interaktive Video im

Tabelle 17: Interaktive Experimentiervideos und deren Mindestlängen

Interaktives Experimentiervideo	Mindestlänge in Sekunden
Farbstoff in Wasser	175
Ei in Salzwasser	208
Bilden und Lösen von Salzkristallen	222
Gesetz der konstanten Proportionen	162
Partikel in der Rauchkammer	219
Elektrolyse mit Knallgasprobe	161
Ölfleckversuch	186
Feldemissionsmikroskop	186

Vorfeld abgespielt und die benötigte Zeit gemessen. Dabei wurde das Experimentivideo möglichst zügig aber ohne vorzuspulen durchgeführt. Optionale Interaktionen und Wiederholungsmöglichkeiten wurden ignoriert und Erklärungstexte höchstens überflogen. Je nach Experimentivideo ergeben sich dadurch Minstdauern zwischen 162 und 222 Sekunden (s. Tabelle 17).

Um eine großzügige Auswahl an Fällen für die Analyse der Ergebnisse zuzulassen, werden alle berücksichtigt, die mindestens die Hälfte der Minstdauer auf der Browserseite des interaktiven Videos verbracht haben. Werden in den folgenden Kapiteln diese Fälle gemeint, so sind sie im Text als „engagiert“ benannt.

7.1 Konzepttest

7.1.1 Voraussetzungen

Auch wenn aus mathematisch statistischen Gründen nicht argumentiert werden kann, dass für die Verwendung von t-Tests oder Varianzanalysen die verwendeten Ratingskalen mindestens intervallskaliert sein müssen, so ist das doch für die messtheoretische Interpretation der Ergebnisse von Bedeutung (Döring, 2023). Bei dem vorliegenden OMC-Test für die Erhebung des Konzeptverständnisses zum Aufbau der Materie ist eine Einschätzung der Differenzen der abgebildeten Niveaustufen, bzw. inwiefern sie äquidistant sind, schwierig. Aus diesen Gründen werden für die Auswertung der Konzepttestergebnisse zwei Verfahren parallel verwendet: der t-Test für abhängige Stichproben und der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test als seine nicht-parametrische Alternative.

Aufgrund der Art des OMC-Tests, der aus verschiedenstufigen Items besteht (s. Kapitel 6.1), werden dabei die jeweiligen Summen der erreichten Testergebnisse verglichen. Deshalb werden auch nur die Fälle berücksichtigt, die sowohl den Pretest als auch den Posttest vollständig ausgefüllt haben ($n = 82$).

7.1.2 Ergebnisse des gepaarten t-Tests

Die Differenz der Pre- und Posttestergebnisse sind gemäß dem Shapiro-Wilk-Test normalverteilt. Im Datensatz befindet sich ein leichter Ausreißer, der für die weitere Analyse aber nicht ausgeschlossen wird.

7 Ergebnisse

Das Ergebnis des gepaarten t-Tests zeigt keinen signifikanten Einfluss der Intervention auf das Konzeptverständnis $t(81) = .711, p = .240$.

Tabelle 18: Konzepttestergebnisse

Messzeitpunkt	Testscore	SD
Pretest	64.70	7.22
Posttest	65.23	7.12

7.1.3 Ergebnisse des Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests

Die visuelle Überprüfung des Histogramms der Differenzen der Post- und Pretest-ergebnisse zeigt eine symmetrische Verteilung der Werte, was eine Voraussetzung für die Durchführung des Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests darstellt.

Das Ergebnis zeigt keinen statistisch signifikanten Unterschied der Medianwerte $z = .554, p = .579$.

7.2 Modellaussagenauswahl

Für die Darstellung der Entwicklungen der Modellaussagenauswahlen werden im Folgenden nur die engagierten Fälle betrachtet. Wie Tabelle 19 zeigt, ist dies an dieser Stelle auch legitim, da die acht Experimente in vergleichbarer Häufigkeit engagiert bearbeitet wurden.

Tabelle 19: Häufigkeiten der engagiert bearbeiteten interaktiven Experimentiervideos

Interaktives Experimentiervideo	Kürzel	Anzahl engagierter Durchführungen
Farbstoff in Wasser	FA	81
Ei in Salzwasser	ES	88
Bilden und Lösen von Salzkristallen	SK	98
Gesetz der konstanten Proportionen	KP	80
Partikel in der Rauchkammer	RA	82
Elektrolyse mit Knallgasprobe	EK	76
Ölfleckversuch	OL	77
Feldemissionsmikroskop	FE	84

Das folgende Säulendiagramm zeigt die Entwicklungen der Modellaussagenauswahlen je Experiment. Wie bei der Präsentation der Ergebnisse der Pilotierung stehen auch hier die dunkelroten Säulenabschnitte für den Anteil an Schüler*innen, die vor der Experimentdurchführung die richtige Modellaussage gewählt haben und danach eine falsche. Dunkelgrün repräsentiert den Anteil an Schüler*innen, der sich nach dem Experiment zur korrekten Modellaussage umentschieden hat, während hellrot und hellgrün die Fälle darstellt, die bei der korrekten bzw. einer falschen Aussage geblieben sind. Die Anordnung der Experimente richtet sich nach den dunkelgrünen Anteilen, von links nach rechts in sinkender Reihenfolge.

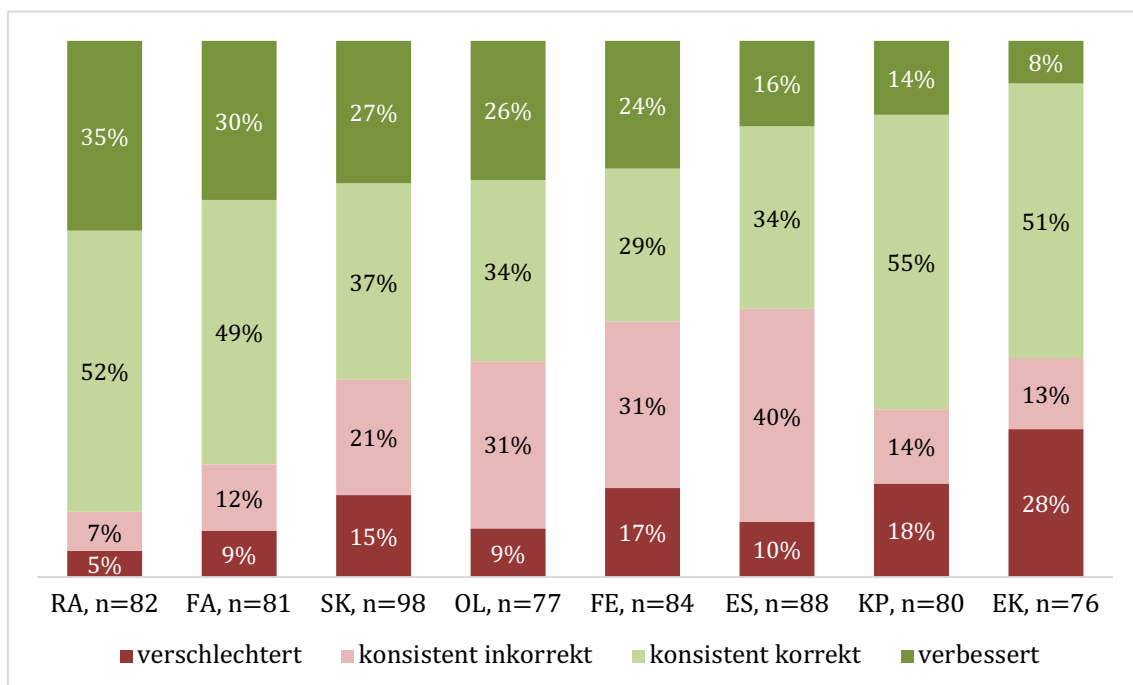


Abbildung 15: Prozentuale Verteilung der Entwicklungen der Modellaussagenauswahlen in der Haupterhebung

Da für die Untersuchung der Überzeugungskraft insbesondere die Fälle interessant sind, in denen die Schüler*innen die Möglichkeit haben sich zu verbessern, also von dem Experiment überzeugt zu werden, sind in dem Säulendiagramm weiter unten die Modellaussagenentwicklungen der Schüler*innen aufgeführt, die vor der Experimentdurchführung eine falsche Modellaussage gewählt haben.

7 Ergebnisse

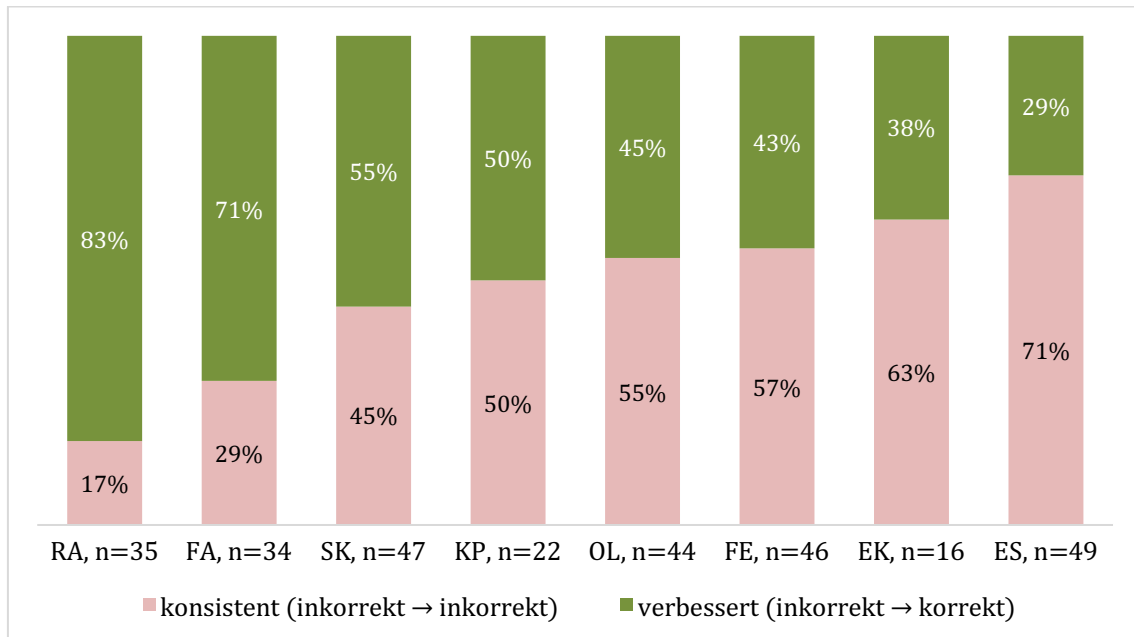


Abbildung 16: Entwicklungen der Modellaussagenauswahlen der Schüler*innen, die vor der Experimentdurchführung eine falsche Aussage gewählt haben

Ein genauerer Blick auf die Verteilungen und eine qualitative Einordnung dieser Ergebnisse sind in Kapitel 8.1.2 zu finden.

7.3 Sicherheit der Modellaussagenauswahl

Nach der Auswahl der Modellaussagen wurde mit einer Skala die Sicherheit dieser eben getroffenen Auswahl erfragt: von 1 – „gar nicht sicher“ bis 4 – „vollkommen sicher“. Die sich daraus ergebenden Mittelwerte sind in Tabelle 20 aufgeführt, mit einer Aufteilung in Sicherheiten vor der Experimentdurchführung und danach. Dabei wurden nur die Angaben der Schüler*innen berücksichtigt, die das jeweilige Experiment auch engagiert bearbeitet haben. Da die Skala vierstufig ist, steht ein Wert unter 2.5 für eine eher geringe mittlere Sicherheit, während ein Wert über 2.5 eine im Schnitt eher hohe Sicherheit bedeutet. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Skala intervallskaliert ist, so wie das bei Likert-Skalen üblicherweise der Fall ist (Döring, 2023).

Tabelle 20: Mittelwerte der angegebenen Sicherheit der Modellaussagenauswahlen

Experiment	Ausgewählte Modellaussage	Sicherheit vor Durchführung	Sicherheit nach Durchführung
Partikel in der Rauchkammer	Richtig	2,56	3,42
	Falsch 1	2,20	3,50
	Falsch 2	2,50	2,25
Farbstoff in Wasser	Richtig	2,62	3,23
	Falsch 1	2,26	2,56
	Falsch 2	2,33	1,80
Bilden und Lösen von Salzkristallen	Richtig	2,31	3,15
	Falsch 1	2,21	2,74
	Falsch 2	2,20	2,94
Gesetz der konstanten Proportionen	Richtig	2,47	3,11
	Falsch 1	2,36	2,33
	Falsch 2	1,83	2,08
Ölfleckversuch	Richtig	2,42	2,89
	Falsch 1	2,17	2,47
	Falsch 2	2,33	2,50
Feldemissionsmikroskop	Richtig	2,58	2,55
	Falsch 1	2,45	2,62
	Falsch 2	2,17	2,36
Elektrolyse mit Knallgasreaktion	Richtig	2,67	3,02
	Falsch 1	1,69	2,83
	Falsch 2	2,00	2,43
Ei in Salzwasser	Richtig	2,78	3,50
	Falsch 1	2,30	2,68
	Falsch 2	2,17	2,67

7.4 Begründung der Sicherheit

Nach der Angabe der Sicherheit mit der Modellaussagenauswahl hatten die Schüler*innen die Möglichkeit, diese schriftlich zu begründen. Da für die Auswertung dieser Freitextbegründungen vor allem von Interesse ist, ob ein Bezug zu den Experimenten besteht, werden nur die Begründungen betrachtet, die zu dem Zeitpunkt nach der Experimentdurchführung genannt wurden. Dabei ist jedoch anzumerken, dass die Angabe einer schriftlichen Begründung im Fragebogen auch übersprungen werden konnte. So wie bei der Angabe der Sicherheit der Modellaussagenauswahl, die im vorherigen Kapitel ausgewertet wurde, sind auch hier nur die Antworten der Schüler*innen berücksichtigt, die die interaktiven Experimentervideos engagiert durchgeführt haben.

Die Auswertung der Freitextantworten geschieht durch eine Einteilung der Aussagen in drei Kategorien. Die erste Kategorie umfasst Aussagen, die einen direkten Bezug zum durchgeführten Experiment beinhalten: z. B. „da ich es in dem video ein wenig beobachten konnte“. Der zweiten Kategorie werden Aussagen zugeordnet, die zwar keinen deutlichen Bezug zum Experiment herstellen, trotzdem aber eine inhaltliche Argumentation beinhalten oder den schulischen Unterricht als Begründung aufführen: z. B. „Durch die Eigenbewegung der Teilchen“ oder „Da wir es so im Unterricht so besprochen haben“. In der dritten Kategorie sind Aussagen zusammengefasst, die entweder keine Begründung beinhalten, diese nichts mit dem Experiment oder einer inhaltlichen Betrachtung gemeinsam haben, oder Verständnisschwierigkeiten als Gründe aufführen. Beispielaussagen dieser dritten Kategorie sind „ist halt so“, „keine Ahnung“ und „klingt logisch“.

Die Häufigkeiten der Begründungen, aufgeteilt auf diese drei Kategorien, sind in Tabelle 21 zu finden. Dabei wird deutlich, dass dieselben Kategorien teils gegenteilig interpretiert werden müssen. Ein Bezug zum Experiment (Kategorie 1), beispielsweise, kann entweder bedeuten, dass das Experiment für eine eher hohe angegebene Sicherheit verantwortlich ist, oder dass es eher verunsichert hat. Ausschlaggebend ist, ob die Angabe als Begründung einer niedrigen oder einer hohen Sicherheit gemacht wurde.¹¹

¹¹ Die ausformulierten Begründungen der Schüler*innen, aufgeteilt in die drei Kategorien, sind im Anhang zu finden.

Damit ein übersichtlicher Vergleich der Häufigkeiten möglich ist, werden an dieser Stelle jeweils zwei Ausprägungen der vierstufigen Skala zur Sicherheit der Modellaussagenauswahl (s. Kapitel 6.2.1) zusammengeführt. Unter den in Tabelle 21 verwendeten Begriff „unsicher“ fallen also die auf der Skala getroffenen Angaben „gar nicht sicher“ und „wenig sicher“, während „sicher“ all die Fälle meint, bei denen auf der Skala „ziemlich sicher“ oder „vollkommen sicher“ ausgewählt wurde.

Die rechte Spalte der Tabelle („Aussortiert“) zählt die Freitextantworten auf, die keiner der drei Kategorien zugeordnet werden können. Sie beinhalten offensichtlich zusammenhangslose Antworten wie „Baum“.

Tabelle 21: Häufigkeiten der kategorisierten Begründungen

Experiment	Sicherheit nach Durchführung	1. Kategorie	2. Kategorie	3. Kategorie	(Aussortiert)
RA	Unsicher	6	0	3	1
	Sicher	50	3	1	2
FA	Unsicher	8	0	1	4
	Sicher	43	5	4	4
SK	Unsicher	6	1	7	0
	Sicher	42	5	13	3
KP	Unsicher	6	1	15	2
	Sicher	24	6	3	2
OL	Unsicher	10	2	11	1
	Sicher	21	3	7	2
FE	Unsicher	13	0	16	2
	Sicher	24	3	6	1
EK	Unsicher	7	1	7	2
	Sicher	28	4	4	5
ES	Unsicher	5	0	8	2
	Sicher	41	4	6	4

7.5 Begründung der Modellaussagenauswahl

Für die Prüfung auf Signifikanzunterschiede in den zwei Skalen *Beobachtungen* und *Intuition*, die die Ausprägungen zwei möglicher Begründungen für den Wechsel oder das Beibehalten einer Modellaussagenauswahl erheben (s. Kapitel 6.2.2), wird jeweils eine ANOVA mit Messwiederholung durchgeführt, mit dem jeweiligen Experiment als Innersubjektfaktor. Für diese Varianzanalyse ist ein balanciertes Design notwendig, was bedeutet, dass nur die Proband*innen berücksichtigt werden können, bei denen zu jedem Messzeitpunkt Daten vorliegen (Bühner & Ziegler, 2009). Deswegen sind die Stichproben auf die Schüler*innen reduziert, die auch alle acht Experimentiervideos der Intervention durchgeführt haben.

Sowohl die Skala *Beobachtungen* als auch die nachfolgend betrachteten Skalen *Intuition* und ICL sind fünfstufige Likert-Skalen. Es wird davon ausgegangen, dass sie intervallskaliert sind, so wie das bei Likert-Skalen üblicherweise der Fall ist (Döring, 2023). Damit sind auch Rechenoperationen wie die Mittelwertbildung und Tests wie die Varianzanalyse erlaubt. Für eine Überprüfung der internen Konsistenz dieser Skalen wird außerdem jeweils der Konsistenzkoeffizient Cronbachs α ermittelt, der die durchschnittliche Korrelation zwischen den Einzel-Items darstellt (Döring, 2023).

Für die drei Skalen ergeben sich Cronbachs α -Werte zwischen .77 und .86 (Skala *Beobachtungen*), .82 und .90 (Skala *Intuition*), .86 und .92 (ICL).¹² Sie liegen damit in einem Bereich, der für eine gute Reliabilität der Skalen spricht (ebd.). Die Ergebnisse der Trennschärfen einzelner Items der drei Skalen, die die Korrelationen der jeweiligen Items mit dem Gesamtscore der Skala darstellen (ebd.), fallen ebenfalls zufriedenstellend aus. Deshalb werden keine Items von der weiteren Analyse ausgeschlossen.¹³

¹² Da diese Skalen in der Erhebung mehrmals eingesetzt werden (nach jedem Experiment), wird der Konsistenzkoeffizient für jeden Einsatz der jeweiligen Skala bestimmt. Deshalb sind für jede Skala mehrere Werte des Cronbachs α vorhanden.

¹³ Die genauen Werte für die Itemtrennschärfen und Cronbachs α , wenn das jeweilige Item ausgeschlossen wird, sind im Anhang zu finden.

7.5.1 Beobachtungen

In den Mittelwerten der Skala *Beobachtungen* zeigt die explorative Datenanalyse drei leichte Ausreißer. Diese werden für die weitere Auswertung nicht ausgeschlossen. Die Ergebnisse der Tests auf Normalverteilung der abhängigen Variable zeigen bei mehreren der acht Faktoren (die Experimente) eine Verletzung dieser Voraussetzung. Außerdem legt die visuelle Überprüfung der Q-Q-Plots eine leichte Schiefe der Daten nahe. Da jedoch eine ausreichend große Stichprobe vorliegt ($n = 46$) und dieses parametrische Verfahren als robust gegenüber Annahmeverletzungen wie die Normalverteilung gilt (Bühner & Ziegler, 2009), kann die rmA-NOVA dennoch durchgeführt werden.

Tabelle 22: Deskriptive Statistiken der abhängigen Variable *Beobachtungen* ($n = 46$) in steigender Reihenfolge

Experiment	M	SD
Elektrolyse mit Knallgasprobe	3.43	.89
Ei in Salzwasser	3.52	.90
Gesetz der konstanten Proportionen	3.52	.87
Feldemissionsmikroskop	3.69	.80
Ölfleckversuch	3.73	.75
Diffusion von Farbstoff in Wasser	3.76	.91
Bilden und Lösen von Salzkristallen	3.77	.82
Partikel in der Rauchkammer	3.81	.80

Die nach Greenhouse-Geisser korrigierte rmANOVA zeigt das Vorhandensein signifikanter Unterschiede der abhängigen Variable *Beobachtungen* zwischen den Experimenten $F(5.77, 259.44) = 2.31, p = .037$, partielles $\eta^2 = .05$. Die Unterschiede der nach Bonferroni korrigierten paarweisen Vergleiche werden jedoch statistisch nicht signifikant.

7.5.2 Intuition

In den Mittelwerten der Skala *Intuition* befinden sich sieben leichte Ausreißer. Diese werden von der weiteren Analyse nicht ausgeschlossen. Die Ergebnisse der Tests auf Normalverteilung zeigen bei mehreren der acht Experimente eine Verletzung dieser Voraussetzung. Außerdem legt auch hier die visuelle Überprüfung

7 Ergebnisse

der Q-Q-Plots eine leichte Schiefe der Daten nahe. Da jedoch eine ausreichend große Stichprobe vorliegt ($n = 46$) und dieses parametrische Verfahren als robust gegenüber Annahmeverletzungen wie die Normalverteilung gilt (Bühner & Ziegler, 2009), wird die rmANOVA durchgeführt.

Tabelle 23: Deskriptive Statistiken der abhängigen Variable *Intuition* ($n = 46$) in steigender Reihenfolge

Experiment	M	SD
Bilden und Lösen von Salzkristallen	2.54	1.03
Feldemissionsmikroskop	2.55	.97
Ei in Salzwasser	2.55	.95
Diffusion von Farbstoff in Wasser	2.62	.92
Ölfleckversuch	2.66	.98
Elektrolyse mit Knallgasprobe	2.79	.98
Gesetz der konstanten Proportionen	2.79	.98
Partikel in der Rauchkammer	2.79	1.13

Die rmANOVA zeigt keine signifikanten Unterschiede zwischen den Mittelwerten der Skala *Intuition* $F(5.38, 241.90) = 1.69, p = .133$.

7.6 Merkmale der Experimente

7.6.1 Intrinsic Cognitive Load

Die wahrgenommene inhaltliche Schwierigkeit der Experimente, gemessen mit dem ICLS (s. Kapitel 6.3.1), wird ebenfalls mit einer rmANOVA auf Signifikanzunterschiede geprüft. Die explorative Datenanalyse zeigt vier leichte Ausreißer, die für die weitere Analyse nicht ausgeschlossen werden. Die Ergebnisse der Tests auf Normalverteilung zeigen bei fast allen der acht Experimente eine Verletzung dieser Voraussetzung. Außerdem legt auch hier die visuelle Überprüfung der Q-Q-Plots eine Schiefe der Daten nahe. Da jedoch eine ausreichend große Stichprobe vorliegt ($n = 46$) und wegen der Robustheit dieses Verfahrens gegenüber Annahmeverletzungen wie die Normalverteilung (Bühner & Ziegler, 2009), kann die rmANOVA durchgeführt werden. Die sich ergebenden Mittelweltergebnisse sind in folgender Tabelle aufgeführt.

Tabelle 24: Deskriptive Statistiken der abhängigen Variable ICL
(n = 45) in steigender Reihenfolge

Experiment	M	SD
Ei in Salzwasser	2.11	.81
Farbstoff in Wasser	2.13	.98
Partikel in der Rauchkammer	2.28	.99
Bilden und Lösen von Salzkristallen	2.46	1.01
Ölfleckversuch	2.47	1.04
Gesetz der konstanten Proportionen	2.53	.96
Elektrolyse mit Knallgasreaktion	2.56	.96
Feldemissionsmikroskop	2.79	1.08

Die rmANOVA mit Greenhouse-Geisser-Korrektur zeigt einen statistisch signifikanten Unterschied in den durchschnittlichen ICL-Werten $F(4.84, 213.07) = 5.26$, $p < .001$, partielles $\eta^2 = .11$. Laut Bonferroni-korrigiertem post-hoc Test erzielt das Experiment *Elektrolyse mit Knallgasreaktion* einen signifikant höheren ICL-Wert als das Experiment *Farbstoff in Wasser* und als das Experiment *Ei in Salzwasser*. Ebenso ist der durchschnittliche ICL-Wert von *Feldemissionsmikroskop* signifikant höher als von *Farbstoff in Wasser* und *Ei in Salzwasser* (s. Tabelle 25).

Tabelle 25: Paarweise Vergleiche durchschnittlicher ICL-Werte. Die Unter- und Obergrenze beziehen sich auf das 95%-Konfidenzintervall für die Differenz.

Experimentenpaar	M_{Diff}	p	Untergrenze	Obergrenze
Elektrolyse mit Knallgasreaktion Farbstoff in Wasser	.422	.019	.039	.806
Elektrolyse mit Knallgasreaktion Ei in Salzwasser	.450	.003	.096	.804
Feldemissionsmikroskop Farbstoff in Wasser	.656	.005	.124	1.187
Feldemissionsmikroskop Ei in Salzwasser	.683	.006	.112	1.245

7.6.2 System Usability

Die Reliabilitätsanalyse der System Usability-Skala ergibt einen zufriedenstellenden Wert von Cronbachs $\alpha = .86$. Die Ergebnisse der Trennschärfe der einzelnen Items sind ebenfalls zufriedenstellend, weshalb die Skalenergebnisse ohne den Ausschluss einzelner Items betrachtet werden.¹⁴

Für die Auswertung des System Usability-Scores werden nur die Angaben der Proband*innen berücksichtigt, die mindestens eines der Experimentiervideos engagiert bearbeitet haben ($n = 100$). Das Ergebnis des System Usability-Scores beträgt im Mittel 71.5 ($SD = 1.8$). Auf der Skala von Bangor et al. (2009) entspricht das einer Einordnung im Bereich „OK“, knapp unter „Gut“.

7.6.3 Versuchsaufbau

Die Einschätzung der in den Experimenten verwendeten Geräte und Gegenstände wurde anhand von zwei Einzelindikatoren erhoben (s. Tabelle 11). Damit davon ausgegangen werden kann, dass die Schüler*innen den Aufbau des jeweiligen Experiments auch ausreichend gründlich wahrgenommen haben, werden nur die Fälle berücksichtigt, in denen das jeweilige Experimentiervideo auch engagiert bearbeitet wurde.

Tabelle 26: Mittelwertergebnisse des Items „Bei dem Experiment wurden überwiegend Gegenstände verwendet, die ich aus meinem Alltag kenne“, in steigender Reihenfolge

Experiment	M	SD
Feldemissionsmikroskop ($n = 81$)	2.30	1.35
Gesetz der konstanten Proportionen ($n = 79$)	2.33	1.30
Elektrolyse mit Knallgasreaktion ($n = 71$)	2.42	1.13
Partikel in der Rauchkammer ($n = 81$)	2.43	1.23
Ölfleckversuch ($n = 71$)	2.90	1.15
Farbstoff in Wasser ($n = 78$)	3.50	1.04
Bilden und Lösen von Salzkristallen ($n = 96$)	3.57	1.15
Ei in Salzwasser ($n = 85$)	3.93	1.20

¹⁴ Die genauen Werte der Itemtrennschärfe und Cronbachs α , wenn das jeweilige Item ausgeschlossen wird, sind im Anhang zu finden.

Aus dem Grund unterscheidet sich die Stichprobengröße für jedes Experiment. Die sich ergebenden Rangfolgen der Experimente für die zwei Items sind in Tabelle 26 und in Tabelle 27 zu sehen.

Tabelle 27: Mittelweltergebnisse des Items „Die Geräte, die im Experiment benutzt wurden, gibt es überwiegend an einer Schule oder Universität“, in steigender Reihenfolge

Experiment	M	SD
Elektrolyse mit Knallgasreaktion (n = 72)	3.38	1.12
Feldemissionsmikroskop (n = 81)	3.51	1.29
Gesetz der konstanten Proportionen (n = 79)	3.53	1.12
Ölfleckversuch (n = 71)	3.55	1.18
Partikel in der Rauchkammer (n = 82)	3.60	1.12
Ei in Salzwasser (n = 85)	3.65	1.39
Farbstoff in Wasser (n = 78)	3.72	1.18
Bilden und Lösen von Salzkristallen (n = 96)	3.99	1.18

8 Diskussion

8.1 Interpretation der Ergebnisse

Für die Interpretation der Ergebnisse wird noch einmal auf die einzelnen Teile der Erhebung eingegangen und diese in einer vergleichenden Betrachtung der Experimente zusammengeführt. Ein Überblick über die Forschungshypothesen mit den dazugehörigen Entscheidungen über deren Annahme bzw. Verwerfung sind am Ende des Kapitels auf Seite 116 zu finden.

8.1.1 Interpretation der Ergebnisse des Konzepttests

Die Ergebnisse der Tests auf Signifikanzunterschiede zwischen den Pre- und Post-testergebnissen legen nahe, dass die Nullhypothese nicht verworfen werden kann. Die Intervention mit den acht interaktiven Experimentiervideos zum Teilchenmodell führt zu keiner statistisch signifikanten Verbesserung des Konzeptverständnisses.

Der wahrscheinlich naheliegendste Grund dafür ist die relativ kurze Intervention, die lediglich aus der selbständigen Durchführung mehrerer Experimente zum Teilchenmodell besteht. Eine messbare Verbesserung des Konzeptverständnisses ist am ehesten dann zu erwarten, wenn die Experimente nicht für sich allein stehend eingesetzt werden, sondern Teil eines längerfristigen Unterrichtskonzeptes sind.

Eine weitere Rolle könnte die vielfache Konfrontation der Schüler*innen mit Alternativaussagen zum Teilchenmodell darstellen. Auch wenn die meiste Zeit der Intervention mit den interaktiven Experimentiervideos verbracht wird, die adäquate Vorstellungen zum Aufbau der Materie vermitteln, könnte das mehrfache Nachfragen nach der Übereinstimmung mit unterschiedlichen Aussagen zum Teilchenmodell eine verunsichernde Wirkung haben und damit dem Aufbau eines einheitlichen Teilchenbildes im Wege stehen.

8.1.2 Vergleichende Betrachtung der Überzeugungskraft der Experimente

Wie in den Säulendiagrammen zu sehen ist, sind zum Teil starke Unterschiede in den Modellaussagenentwicklungen zu erkennen, insbesondere zwischen den vier

Experimenten *Farbstoff in Wasser*, *Partikel in der Rauchkammer*, *Elektrolyse mit Knallgasprobe* und *Ei in Salzwasser*. Für eine bessere Gegenüberstellung werden die Modellaussagenentwicklungen der Experimente hier noch einmal in der Form von Sankey-Diagrammen dargestellt. Die Säulen auf der linken Seite der Diagramme stellen dabei die Aufteilung der Modellaussagenauswahlen vor der Experimentdurchführung dar, während die rechte Seite für die Auswahlen nach dem Experiment steht (s. Abbildung 17 weiter unten für eine Erklärung des Diagramms).

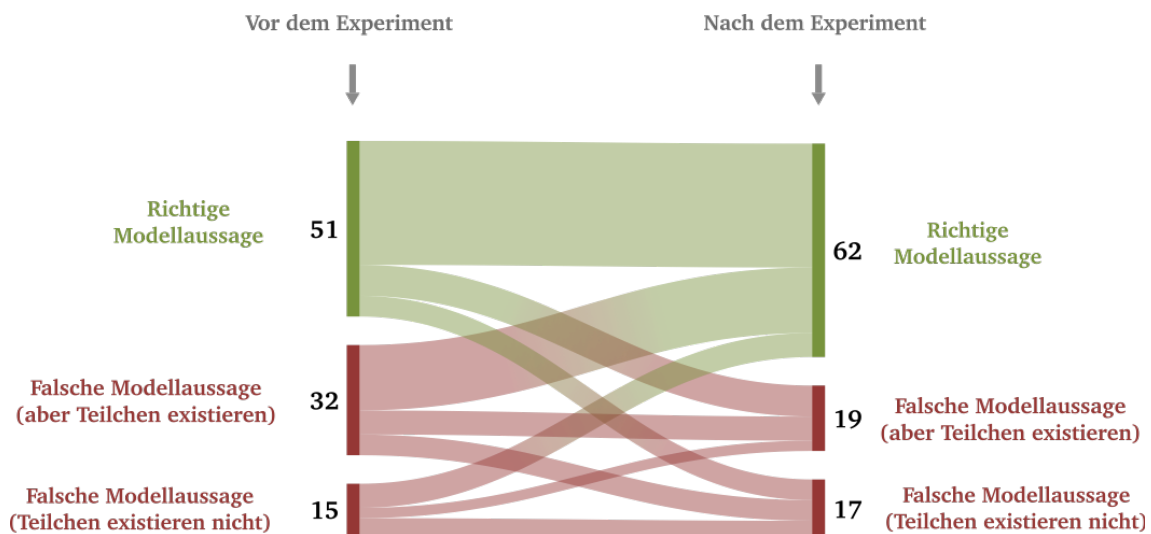


Abbildung 17: Erklärung der verwendeten Sankey-Diagramme

Für die zwei als vergleichsweise überzeugend eingestuften Experimente ergeben sich folgende Verteilungen.

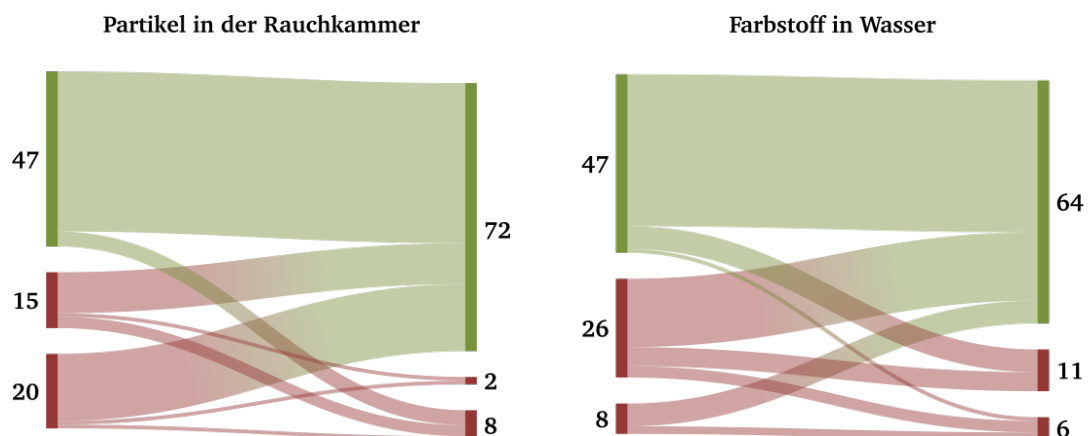


Abbildung 18: Modellaussagenentwicklungen der zwei als überzeugend eingestuften Experimente

Bei beiden Verteilungen ist zu erkennen, dass auch schon vor der Experimentdurchführung ein hoher Anteil an Schüler*innen die korrekte Modellaussage wählt. Was die Experimente jedoch vergleichsweise überzeugend macht, ist der geringe Anteil an Schüler*innen, der zu einer falschen Modellaussage wechselt und der hohe Anteil derer, die sich nach dem Experiment zu der richtigen Aussage umentscheiden. Dies ist vor allem dann auffallend, wenn die Diagramme der als weniger überzeugend eingestuften Experimente als Vergleich herangezogen werden (vgl. Abbildung 19).

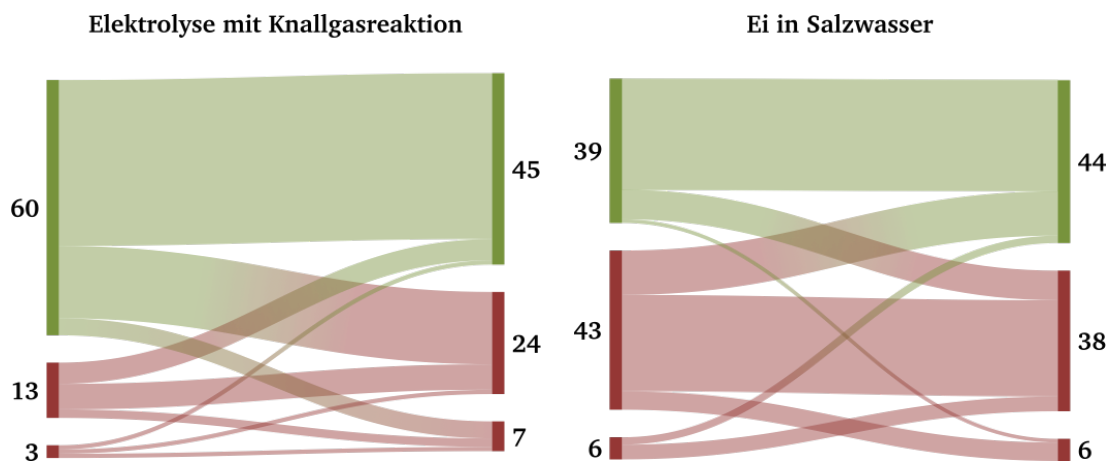


Abbildung 19: Modellaussagenentwicklungen der zwei als wenig überzeugend eingestuften Experimente

Bei dem Experiment *Elektrolyse mit Knallgasreaktion* ist der große Anteil an Schüler*innen auffällig, der von der korrekten Aussage zu der ersten Alternativaussage wechselt. Bei *Ei in Salzwasser* wiederum entscheiden sich nach der Durchführung des Experiments zwar mehr Schüler*innen für die korrekte Modellaussage als davor, es gibt jedoch einen so großen Anteil an Schüler*innen, die bei derselben inkorrekten Modellaussage bleiben, wie bei keinem anderen der untersuchten Experimente. Da es sich dabei um die erste Alternativaussage handelt, liegt die Vermutung nahe, dass die gängige Schülervorstellung, die darin adressiert wird („Zwischen Teilchen ist eine Substanz, wie z. B. Wasser oder Luft“) ausschlaggebend ist für die Attraktivität dieser Option.

Eine weitere naheliegende Erklärung der unterschiedlichen Überzeugungskraft dieser vier Experimente bietet ein Blick auf die Unterschiedlichkeit der experimentellen Handlungen und die damit verbundenen Beobachtungen. Obwohl sowohl bei den überzeugenden Experimenten als auch bei den weniger überzeugenden

jeweils einmal mit eher alltäglichen Materialien (*Farbstoff in Wasser* und *Ei in Salzwasser*) und einmal mehr mit Laborgeräten gearbeitet wird (*Elektrolyse mit Knallgasreaktion* und *Partikel in der Rauchkammer*), sind die Beobachtungen, die in den überzeugenden Experimenten gemacht werden, übersichtlicher und auf direktere Weise auf das Teilchenmodell und seine Eigenschaften übertragbar: Es ist vergleichsweise einfach, auf die Eigenbewegung der Teilchen zu schließen, nachdem die Bewegung der Rauchpartikel oder die Diffusion des farbigen Wassers betrachtet wurde. Die Elektrolyse mit Knallgasprobe zeigt zwar auch anschauliche Phänomene, die Übertragung der Erklärungen dieser Phänomene auf das Teilchenmodell verlangt allerdings eine hohe Anzahl an Denkschritten (vgl. die unterschiedlich eingeschätzte inhaltliche Schwierigkeit der Experimente in Tabelle 9 auf Seite 78).

Gleichzeitig ist nicht auszuschließen, dass Schüler*innen lediglich den Eindruck haben, sie würden die Beobachtungen in den Experimenten *Farbstoff in Wasser* und *Partikel in der Rauchkammer* richtig interpretieren. Schließlich ist es leicht möglich, den Aussagen zum Teilchenmodell zuzustimmen, die diese Experimente vermitteln, und gleichzeitig unangemessene makroskopische Eigenschaften den Teilchen zuzuschreiben: Sowohl die Partikel in der Rauchkammer als auch der farbige Teil des Wassers können leicht als die eigentlich nicht sichtbaren Teilchen interpretiert werden, vor allem da sich diese makroskopischen Objekte oder Stoffe ähnlich verhalten wie die submikroskopischen Teilchen, die für die Deutung der Beobachtungen herangezogen werden und auf die eigentlich geschlossen werden soll (sie bewegen sich, sie verteilen sich im Raum).

Um über die Frage Aufschluss zu geben, ob solch ein scheinbares Verständnis in wesentlichem Maße für die hohe Überzeugungskraft mancher Experimente verantwortlich ist, wäre eine zusätzliche qualitative Erhebung interessant, da damit Konzeptvorstellungen verlässlich und differenziert erhoben werden können.

Im Vergleich schneidet unter den übrigen vier Experimenten das Experiment *Bilden und Lösen von Salzkristallen* als am überzeugendsten ab (s. Abbildung 20). Das wird vor allem durch den großen Anteil an Schüler*innen deutlich, die von der ersten Alternativaussage zu der richtigen Aussage wechseln. Auch beim *Ölfleckversuch* ist der Anteil der Schüler*innen mit der richtigen Modellaussagenauswahl nach der Experimentdurchführung größer als davor, allerdings verteilen sich die Schüler*innen, die zu Beginn die erste falsche Modellaussage gewählt haben, nach

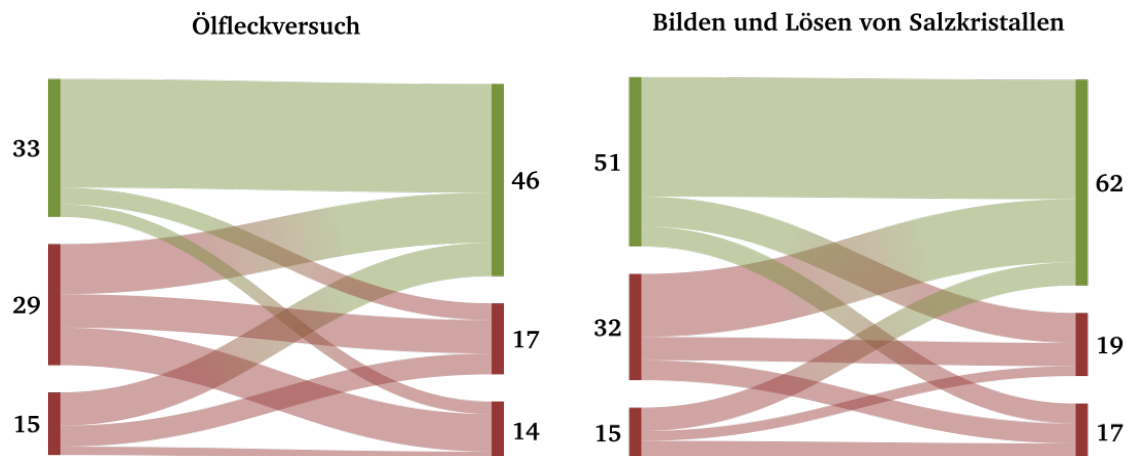


Abbildung 20: Modellaussagenentwicklungen der Experimente *Ölfleckversuch* und *Bilden und Lösen von Salzkristallen*

dem Experiment relativ gleichmäßig auf die drei möglichen Optionen. Bemerkenswert ist dabei der im Vergleich zu den anderen Experimenten große Anteil an Schüler*innen, die zu der Aussage wechseln, die die Existenz von Teilchen bestreitet.

Bei den letzten beiden Experimenten lassen sich aus den Verteilungen der Auswahlen mehrere Rückschlüsse auf die Modellaussagen selbst ziehen. Im Vergleich zu den übrigen Experimenten fällt beim *Feldemissionsmikroskop* auf, dass sich die Auswahlen der Schüler*innen vor und nach dem Experiment gleichmäßiger verteilen und es ähnlich viele Schüler*innen gibt, die sich in die eine oder andere

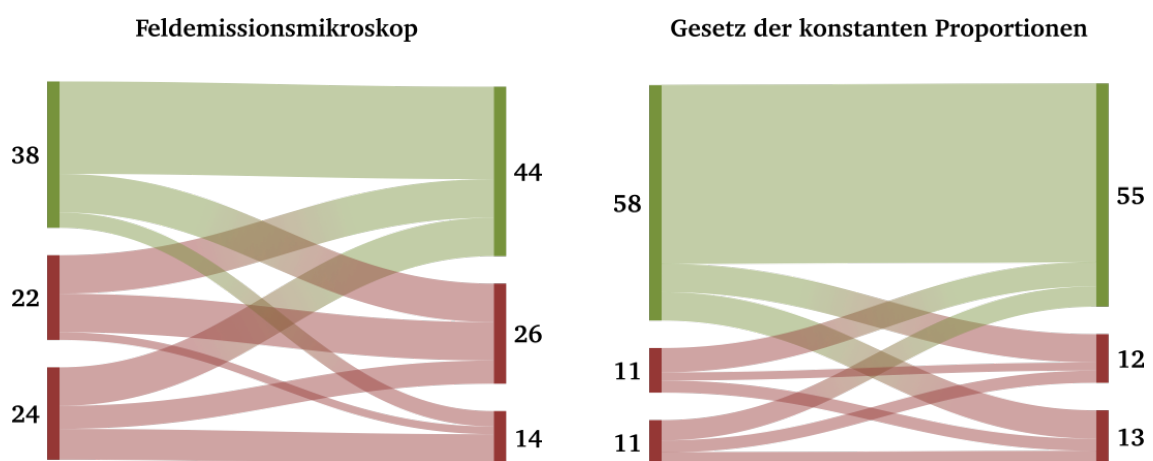


Abbildung 21: Modellaussagenentwicklungen der zwei Experimente *Feldemissionsmikroskop* und *Gesetz der konstanten Proportionen*

Richtung umentscheiden (s. Abbildung 21). Damit ist die Interpretation naheliegend, dass die drei wählbaren Modellaussagen für die Schüler*innen ähnlich plausibel klingen, auch nach der Durchführung des Experiments. Bei dem Experiment *Gesetz der konstanten Proportionen* hingegen, ist der große Anteil an Schüler*innen auffällig, der bereits vor der Durchführung des Experiments die korrekte Modellaussage wählt. Das lässt vermuten, dass entweder die zwei Alternativaussagen nicht attraktiv genug sind und deshalb nach dem Ausschlussverfahren weniger häufig gewählt werden oder dass der zu vermittelnde Aspekt des Teilchenmodells durch schulisches Vorwissen bereits bekannt ist. Letzteres ist möglich, da die Modellaussage eines der chemischen Grundgesetze anspricht, das typischerweise auch schon im Chemieunterricht der Sekundarstufe I behandelt wird.

Sicherheit der Modellaussagenauswahl

Betrachtet man die durchschnittlichen Sicherheiten, mit denen die Modellaussagenauswahlen getroffen werden (s. Tabelle 20 auf Seite 97), so fällt auf, dass die Auswahl der richtigen Modellaussage nach dem Experiment mit einer deutlich höheren Sicherheit angegeben wird als davor. Am deutlichsten ist das bei den Experimenten *Partikel in der Rauchkammer* und *Bilden und Lösen von Salzkristallen* der Fall und spricht im Allgemeinen für die Überzeugungskraft der Experimente. Eine Ausnahme stellt das *Feldemissionsmikroskop* dar, bei dem sich die Sicherheit der korrekten Modellaussage leicht verschlechtert.

Interessanterweise erhält das Experiment Ei in Salzwasser, das gemäß der Verteilung der Modellaussagenauswahlen als wenig überzeugend eingestuft wird, eine starke Verbesserung der Sicherheit mit der korrekten Modellaussage und sogar den höchsten Wert aller untersuchten Experimente. Daraus lässt sich schließen, dass die (vergleichsweise wenigen) Schüler*innen, die aufgrund des Experiments die korrekte Modellaussage auswählen, dies zumindest mit einer hohen Sicherheit tun.

Die nächsthöchsten Werte der durchschnittlichen Sicherheit nach Auswahl der korrekten Modellaussage erhalten die Experimente *Partikel in der Rauchkammer*, *Farbstoff in Wasser* und *Bilden und Lösen von Salzkristallen*. Dies sind auch die Experimente, die als eher überzeugend eingestuft wurden (s. S. 96), was die Hypothese 2.2 stützt.

Die angegebenen durchschnittlichen Sicherheiten zu den falschen Modellaussagenauswahlen ergeben ein weniger einheitliches Bild. In den meisten Fällen ist jedoch auch hier, wenn auch nur leicht, nach den Experimenten eine Steigerung der Sicherheit zu beobachten. Die größten Sprünge machen dabei die durchschnittlichen Sicherheiten bei den Experimenten *Partikel in der Rauchkammer* und *Elektrolyse mit Knallgasreaktion*. Das spricht dafür, dass die Alternativaussagen dieser zwei Experimente, die das Bestehen von Teilchen nicht bestreiten, aber Beschreibungen enthalten, die durch die Beobachtungen der Experimente nicht gestützt werden, immer noch attraktiv wirken können. Dabei ist jedoch zu beachten, dass sich die Mittelwertangaben für die Sicherheit der falschen Modellaussagenauswahlen oft aus sehr kleinen Stichprobengrößen ergeben (vgl. Anzahl der falschen Modellaussagenauswahlen in den Sankey-Diagrammen). Im Falle des vorher beschriebenen Experiments *Partikel in der Rauchkammer* zum Beispiel haben nur zwei Personen nach der Durchführung des Experiments die erste Alternativaussage gewählt.

Begründungen der Sicherheit

Die Begründungen für die Modellaussagenauswahlen nach den Experimenten stützen die Interpretationen, die bisher zu der unterschiedlichen Überzeugungskraft der Experimente formuliert wurden. Besonders nach *Partikel in der Rauchkammer*, *Farbstoff in Wasser* und *Bilden und Lösen von Salzkristallen* wird eine sichere Modellaussagenauswahl mit den Beobachtungen aus dem jeweiligen Experiment begründet (s. Spalte „1. Kategorie“ in Tabelle 21 auf S. 99). Bei Experimenten, die als eher nicht überzeugend eingestuft wurden, ist auch bei einer Unsicherheit mit der Modellaussagenauswahl diese mit den Beobachtungen aus dem Experiment begründet (siehe z. B. *Feldemissionsmikroskop* in Tabelle 21). In diesen Fällen hat das Experiment die Schüler*innen ihren eigenen Angaben zufolge verunsichert oder zumindest keine Erklärung bereitgestellt, die sie für eine sichere Modellaussagenauswahl hätten nutzen können.

Begründungen der Modellaussagenauswahl

Die Ergebnisse der zwei Skalen *Beobachtungen* und *Intuition*, die die Zustimmung mit zwei Argumentkategorien als Begründung für den Wechsel oder das Beibehalten einer Modellaussage erheben (s. Kapitel 6.2.2), zeigen keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den Experimenten (s. S. 101). Anhand dieser Daten

kann also nicht darauf geschlossen werden, dass gemäß des ELM of Persuasion (s. Kapitel 2.3.2) bestimmte Experimente eher zu einer Einstellungsänderung führen, die auch langfristiger Natur ist.

Dennoch zeigt ein Blick auf die Rangfolge der Experimente, die durch den Mittelwertvergleich der Skala *Beobachtungen* entsteht (s. Tabelle 14 auf S. 86), dass die Experimente am höchsten abschneiden, die auch durch die Verteilung der Modellaussagenwahl als überzeugend eingestuft werden (*Partikel in der Rauchkammer, Bilden und Lösen von Salzkristallen, Farbstoff in Wasser*). Wird also anhand eines Experiments häufig zur richtigen Modellaussage gewechselt, dann wird das auch eher mit den Beobachtungen aus dem Experiment begründet.

8.1.3 Merkmale der Experimente

Inhaltliche Schwierigkeit und Versuchsaufbau

Die Ergebnisse des gemessenen *Intrinsic Cognitive Load* zeigen statistisch signifikante Unterschiede zwischen vier der Experimente (s. Tabelle 25 auf S. 103). Das *Feldemissionsmikroskop* und die *Elektrolyse mit Knallgasreaktion* werden als inhaltlich schwieriger wahrgenommen als die Experimente *Ei in Salzwasser* und *Farbstoff in Wasser*.

Bemerkenswert daran ist, dass sich diese Rangfolge mit der im Vorfeld durchgeführten Einschätzung der erwarteten kognitiven Beanspruchung widerspricht (vgl. Tabelle 9 auf S. 78). Besonders am Experiment *Ei in Salzwasser* wird dies deutlich: Es hat einen der höchsten eingeschätzten Werte der kognitiven Beanspruchung und gleichzeitig den niedrigsten gemessenen ICL-Wert.

Eine mögliche Erklärung für diesen scheinbaren Widerspruch ergibt sich, wenn die im Vorfeld eingeschätzte Komplexität des Versuchsaufbaus mitbeachtet wird. Hier ergibt sich nämlich nahezu die gleiche Reihenfolge wie durch die Mittelwerte des gemessenen ICL (vgl. Tabelle 10 auf S. 80). Das lässt die Interpretation zu, dass die Schüler*innen vor allem die Experimente als inhaltlich schwierig wahrnehmen, die einen visuell komplexen Aufbau aufweisen.

Das unterstützen auch die Ergebnisse des Items „Bei dem Experiment wurden überwiegend Gegenstände verwendet, die ich aus meinem Alltag kenne“, da sie auf eine Rangfolge der Experimente weisen, die sich mit der im Vorfeld eingeschätzten fast vollständig deckt (vgl. Tabelle 26 auf S. 104 und Tabelle 10 auf S. 80).

Bemerkenswert ist hier jedoch das hohe Abschneiden des *Feldemissionsmikroskops*. Zwar hat es auf der Skala wie erwartet den niedrigsten Wert aller Experimente, erstaunlich ist aber, dass dieser Wert nicht deutlich niedriger ausfällt. Schließlich besteht das Experiment ausschließlich aus Geräten, die unter normalen Umständen keinen Alltagsnutzen haben.

Genauso wäre auch zu erwarten gewesen, dass das *Feldemissionsmikroskop* bei den Ergebnissen des zweiten Items zum Aufbau („Die Geräte, die im Experiment benutzt wurden, gibt es überwiegend an einer Schule oder Universität“) deutlich höher abschneidet, als das der Fall ist. Bei beiden dieser Items muss jedoch auch auf die hohen Standardabweichungen hingewiesen werden, die nahelegen, dass die Versuchsaufbauten derselben Experimente jeweils sehr unterschiedlich bewertet werden.

Ob jedoch überhaupt die hier zumindest im Ansatz erhobene Vertrautheit mit den Versuchsgegenständen mit einer wahrgenommenen Komplexität des Aufbaus gleichzusetzen ist, welche Faktoren diese Wahrnehmung im Detail beeinflussen und inwiefern damit eine direkte Beeinflussung der wahrgenommenen inhaltlichen Schwierigkeit der Experimente einhergeht, kann an dieser Stelle nicht beantwortet werden. Dafür ist unter anderem eine Operationalisierung der wahrgenommenen Komplexität experimenteller Aufbauten im Rahmen einer qualitativen Erhebung notwendig.

System Usability

Das nach der Pilotierung festgesteckte Ziel eines höheren System Usability Scores als mindestens 70 wurde in der Haupterhebung erreicht. Das spricht für eine zufriedenstellende wahrgenommene Benutzungsfreundlichkeit der interaktiven Experimentiervideos.

8.2 Hypothesenentscheidungen

Die im Rahmen dieser Arbeit aufgestellten Hypothesen sind in Tabelle 28 mit dazugehöriger Entscheidung zum Beibehalten oder Verwerfen noch einmal zusammengefasst.

Tabelle 28: Hypothesen und dazugehörige Entscheidungen

Hypothese	Entscheidung
H1: Das Konzeptverständnis der Schüler*innen zum Aufbau der Materie entwickelt sich nach der Bearbeitung der ausgewählten Experimente im Mittel positiv.	verwerfen
H2.1: Die Überzeugungskraft der ausgewählten Experimente unterscheidet sich.	beibehalten
H2.2: Bei überzeugenden Experimenten wird die korrekte Modellaussagenauswahl mit höherer Sicherheit angegeben als bei weniger überzeugenden.	beibehalten
H2.3: Bei Experimenten, die als überzeugender abschneiden, wird dies stärker mit den Beobachtungen aus den Experimenten begründet als bei den restlichen.	verwerfen
H2.4: Experimente mit einer höheren inhaltlichen Schwierigkeit führen seltener zu einem Wechsel zur richtigen Modellaussage.	beibehalten
H2.5: Experimente, die als inhaltlich schwieriger wahrgenommen werden, führen seltener zu einem Wechsel zur richtigen Modellaussage	beibehalten
H2.6: Die Experimente, deren Aufbau aus vornehmlich alltäglichen Gegenständen bestehen, werden als überzeugender wahrgenommen.	verwerfen

Bei der Entscheidung zum Beibehalten der Hypothese 2.2 ist anzumerken, dass das Experiment *Ei in Salzwasser* eine Ausnahme dieses Zusammenhangs darstellt, da es im Gegensatz zu den restlichen wenig überzeugenden Experimenten einen hohen durchschnittlichen Wert der Sicherheit erhält, wenn die korrekte Modellaussage nach Durchführung des Experiments gewählt wird (s. Tabelle 20 auf S. 97). Da sich jedoch für die restlichen Experimente der in H2.2 formulierte Zusammenhang bestätigt, wird die Hypothese dennoch beibehalten.

Hypothese 2.3 wird als nicht bestätigt gewertet, da in den Ergebnissen der Skalen *Beobachtungen* und *Intuition* zwischen den Experimenten keine statistisch signifikanten Unterschiede erkennbar sind. Dabei sollte jedoch nicht außer Acht gelassen werden, dass die Rangfolge der Mittelwerte der Skala *Beobachtungen* ein Bild

zeichnet, das die Hypothese stützt, genauso wie die in den Freitextantworten getroffenen Begründungen für die Sicherheit einer Modellaussagenauswahl. Letztere zeigen nämlich, dass bei überzeugenden Experimenten die Modellaussagenauswahl auch überwiegend mit dem jeweiligen Experiment begründet wird.

Aufgrund der im Vorfeld eingeschätzten kognitiven Beanspruchung der Experimente verglichen mit der Rangfolge, die anhand der prozentualen Anteile der Schüler*innen, die zur richtigen Modellaussage wechseln, entsteht (s. Abbildung 16 auf S. 96), wird die Hypothese 2.4 beibehalten.

Aufgrund der durch die gemessenen ICL-Werte entstehenden Rangfolge der Experimente (s. Tabelle 24 auf S. 103), abgeglichen mit den Ergebnissen der prozentualen Verteilung der Schüler*innen, die zur richtigen Modellaussage wechseln (s. S. 96), wird auch Hypothese 2.5 beibehalten. Allerdings ergibt sich hier kein so eindeutiges Bild wie bei der Betrachtung der Hypothese 2.4, insbesondere aufgrund des Experiments *Ei in Salzwasser*, das eine Sonderrolle einnimmt: Für die wahrgenommene inhaltliche Schwierigkeit erhält es einen unerwartet niedrigen Wert.

Hypothese 2.6 wird auf Basis der eingeschätzten Komplexität des Aufbaus (s. Tabelle 10 auf S. 80) und den Ergebnissen zur unterschiedlichen Überzeugungskraft der Experimente verworfen. Für ein Beibehalten dieser Hypothese hätte zum Beispiel das Experiment *Ei in Salzwasser* als überzeugend abschneiden müssen und das Experiment *Partikel in der Rauchkammer* als wenig überzeugend.

8.3 Limitationen

Für die Einschätzung der Aussagekraft der hier vorgestellten Ergebnisse sind einige Einschränkungen zu beachten. Zum einen hat die Studie nur eine begrenzte externe Validität, da sich das Szenario, in dem die interaktiven Experimentiervideos eingesetzt wurden, von typischem naturwissenschaftlichen Unterricht unterscheidet: Die Schüler*innen führten die Experimente in isolierter Form durch, ohne Teil einer oder mehrerer Unterrichtseinheiten zu sein. Für die vorliegenden Fragestellungen ist dieses Studiendesign passend, da dadurch ein direkter Vergleich der Experimente möglich ist, mit wenig zusätzlichen Störvariablen, die durch unterschiedliche Lehrkräfte entstehen können. Es ist aber im Vergleich zu typischem Physikunterricht künstlich. Deshalb ist davon auszugehen, dass je nach

realer Unterrichtssituation, in denen die Experimente eingesetzt werden, und je nach ihrer Präsentationsform, diese unterschiedlich überzeugend wirken können.

Die Ergebnisse des Pretest-Posttest-Vergleichs sind aus methodischer Sicht dadurch limitiert, dass kein Kontrollgruppenvergleich vorgenommen wurde. Die interne Validität eines solchen Eingruppen-Pretest-Posttest-Designs ist gering, da es kaum möglich ist, beobachtete Veränderungen oder Nichtveränderungen eindeutig auf das Treatment und nicht auf verschiedene Störeinflüsse zurückzuführen (Döring, 2023). Diese Einschränkung wurde jedoch aus forschungsökonomischen Gründen in Kauf genommen, da der Fokus der Erhebung auf dem Vergleich zwischen den interaktiven Experimentiervideos lag, die möglichst auch von der gesamten Stichprobe durchgeführt werden sollten.

Zusätzlich dazu wird die Aussagekraft der Pretest-Posttest-Ergebnisse durch eine geringe Reliabilität des Testinstruments eingeschränkt, da dieses zwar den typischen Lernverlauf des Konzeptverständnisses zum Aufbau der Materie über mehrere Klassenstufen hinweg zuverlässig abbilden kann, weniger jedoch dafür geeignet ist, die Verständnisstufen einzelner Klassen einzuschätzen, die ungefähr auf demselben Niveau liegen (Hadenfeldt et al., 2016).

Um diesen Problemen aus dem Weg zu gehen, hätte statt des OMC-Tests auch eine qualitative Erhebung zum Konzeptverständnis durchgeführt werden können. Das hätte den Vorteil gehabt, dass Konzeptvorstellungen zum Aufbau der Materie differenzierter und genauer hätten erhoben werden können. Um damit ein repräsentatives Urteil über vorhandene Konzepte der untersuchten Gruppe und deren Entwicklungen fällen zu können, wäre allerdings eine vergleichsweise aufwändige Befragung mit einer großen Auswahl an Schüler*innen nötig gewesen, wogegen ebenfalls ökonomische Gründe sprechen.

Die Operationalisierung der Überzeugungskraft durch die Zustimmungsverteilung zu verschiedenen Aussagen zum Teilchenmodell bringt die Schwierigkeit mit sich, dass die Experimente und die jeweils dazugehörigen Modellaussagen nicht eindeutig voneinander trennbar sind. Wie am Beispiel des Experiments *Ei in Salzwasser* deutlich wird (s. Interpretation der Ergebnisse in Kapitel 8.1.2), ist die Vermutung naheliegend, dass nicht die Experimente allein für die Entscheidung einer Modellaussagenauswahl verantwortlich sind, sondern auch die Modellaussagen selbst, die je nach inhaltlichem Fokus unterschiedlich attraktiv sein können. Um das über-

prüfen und angemessen berücksichtigen zu können, wäre eine zusätzliche Erhebung notwendig, in der dieselben Modellaussagen nicht mit Experimenten zur Auswahl gegeben werden, sondern beispielsweise mit Erklärtexten. Dies würde einen Vergleich zwischen der Häufigkeitsverteilung der Meinungsänderungen nach den Experimenten mit denen nach den Erklärtexten ermöglichen.

Außerdem ist zu beachten, dass eine Übereinstimmung mit der korrekten Modellaussage nicht mit dem Vorhandensein des hinter der Aussage liegenden Konzeptverständnisses gleichgesetzt werden kann. Wie in Kapitel 8.1.2 bereits angemerkt, besteht bei manchen der untersuchten Experimente stärker die Gefahr als bei anderen, Beobachtungen unangemessen auf die Teilchenebene zu übertragen. Um das zu überprüfen, wäre auch hier eine qualitative Erhebung notwendig.

Nicht auszuschließen ist außerdem, dass bei der Beantwortung des Fragebogens während der Intervention Lerneffekte eingetreten sind. Auch wenn sich die Aussagen zum Teilchenmodell abhängig vom jeweiligen Experiment unterscheiden, ist erwartbar, dass mit der Durchführung mehrerer Experimente die Wahrscheinlichkeit sinkt, die dritte Antwortmöglichkeit („Teilchen existieren nicht“) auszuwählen. Schließlich legen alle Experimente, wenn auch in unterschiedlicher Form, das Gegenteil nahe. Dadurch wird immer weniger trennbar, ob die Nichtauswahl dieser Aussage aufgrund des jeweiligen Experiments stattfindet, oder aufgrund des generellen Eindrucks, der nach der Durchführung mehrerer Experimente besteht.

Außerdem wurden Sequenzeffekte zwar adressiert, können jedoch nicht vollständig ausgeschlossen werden, da lediglich eine zufällige Reihenfolge der Experimente durch eine blinde Wahl der Schüler*innen festgelegt wurde. Eine systematische Einteilung der Schüler*innen in unterschiedliche Teilgruppen, die die Intervention in unterschiedlicher, festgelegter Reihenfolge durchlaufen, hätte es erlaubt, die Experimentabfolge als zusätzliche Variable in den Varianzanalysen zu berücksichtigen und damit einen Effekt nachweislich auszuschließen (Döring, 2023).

Ermüdungseffekte können ebenfalls aufgetreten sein. Zwar wurde der Posttest zum Konzeptverständnis von der Intervention zeitlich getrennt und auch die Experimente konnten in selbstgewähltem Tempo durchgeführt werden, es ist dennoch möglich, dass mit zunehmender Anzahl der Experimente Überforderungs- oder Ermüdungseffekte eintreten. Im Gegensatz zu realen Experimenten ist das

bei interaktiven Experimentiervideos möglicherweise noch stärker der Fall, da hier stets die gleichen motorischen Tätigkeiten ausgeführt werden (das Bedienen des interaktiven Videos am Bildschirm) und diesbezüglich wenig Abwechslung stattfindet.

Des Weiteren sollte angemerkt werden, dass für den Vergleich der Ergebnisse verschiedener abhängigen Variablen Daten von der jeweiligen Variable zu jedem Messzeitpunkt, also zu jedem Experiment, vorliegen müssen. Dadurch ergeben sich unterschiedliche Stichprobengrößen, die im Vergleich zur Gesamtstichprobe teilweise deutlich reduziert sind (s. z. B. S. 101ff). Das Rechnen parametrischer Tests ist zwar auch in diesen Fällen möglich (s. ebd.), die Ergebnisse wären jedoch im Falle von größeren Stichproben aussagekräftiger, insbesondere wenn mitbeachtet wird, dass die Daten in manchen Fällen Annahmeveraussetzungen der Tests verletzen.

8.4 Implikationen für zukünftige Forschung

Auch wenn die Ergebnisse dieser Studie deutliche Unterschiede zwischen den untersuchten Experimenten zum Teilchenmodell zeigen und sich daraus klare Aussagen über deren Überzeugungskraft treffen lassen, so wird an mehreren Stellen deutlich, dass zusätzliche, insbesondere qualitative Erhebungen wertvolle Erkenntnisse zu dem sich hier präsentierten Bild beisteuern können.

Dabei wäre ein gezielter Blick auf einige der hier verwendeten Experimente interessant, um auf die Qualität der Erkenntnisse schließen zu können, die aufgrund der Experimente gewonnen werden, und beurteilen zu können, inwiefern nur ein scheinbares Verständnis zur Überzeugungskraft dieser Experimente beiträgt. Das betrifft vor allem die Experimente *Partikel in der Rauchkammer* und *Farbstoff in Wasser*, in denen „teilchenhaftes Verhalten“ sichtbar gemacht wird, aber eigentlich auf die unsichtbaren Teilchen geschlossen werden soll.

Weitere Anknüpfungspunkte bieten die Erkenntnisse zum wahrgenommenen Aufbau der Experimente und ihrer inhaltlichen Schwierigkeit. Da die Ergebnisse dieser Studie auf einen Zusammenhang zwischen diesen zwei Variablen deuten, wäre ihre gezielte Untersuchung interessant, besonders unter Berücksichtigung auch des Extraneous Cognitive Load, der durch die Darbietungsart der Experimente verursacht wird. Außerdem sollte dabei die Darstellungsform der Experimente mitbe-

achtet werden. In dieser Untersuchung wurden interaktive Experimentiervideos verwendet, die Wahrnehmung des Versuchsaufbaus und der inhaltlichen Schwierigkeit der Experimente könnten andere Zusammenhänge aufweisen, wenn mit realen Versuchsaufbauten experimentiert wird.

Zusätzlich dazu ist ein Blick von Relevanz, der über die vergleichende Betrachtung von Experimenten zum Teilchenmodell hinausgeht. Da der Aufbau der Materie ein Thema ist, in dem Schülervorstellungen bekanntermaßen trotz Unterricht hartnäckig bestehen bleiben können, lohnt sich eine Untersuchung verschiedener Zugänge zum Teilchenmodell (die Experimente nicht ausschließen müssen) und die Entwicklung und Evaluation von einheitlichen Lehrkonzepten, die das Konzeptverständnis zum Aufbau der Materie nachweislich fördern. Ein Forschungsbeispiel, das diesem Ansatz bereits nachgeht, ist die Arbeit von Budimaier & Hopf (2024).

8.5 Bedeutung für den naturwissenschaftlichen Unterricht

Eines der Hauptergebnisse dieser Studie und gleichzeitig eine bedeutende Erkenntnis für den naturwissenschaftlichen Unterricht ist die unterschiedliche Überzeugungskraft der Experimente zum Teilchenmodell. Dies ist nicht nur in den verschiedenen Verteilungen der Modellaussagenauswahlen der Schüler*innen erkennbar, sondern auch in der Sicherheit, mit der diese Auswahlen nach der jeweiligen Experimentdurchführung getroffen werden.

Zusammen mit der Beachtung der Ergebnisse zur (wahrgenommenen) inhaltlichen Schwierigkeit der Experimente (s. H2.4 und H2.5 auf S.116) kann dies bei der Einführung des Teilchenmodells in der Sekundarstufe I als Entscheidungshilfe passender Experimente dienen. Gleichzeitig verdeutlicht es die Notwendigkeit, mehrere Experimente im Unterricht einzusetzen, die eine Betrachtung des Teilchenmodells und seiner Eigenschaften aus unterschiedlichen Blickwinkeln erlauben. Die Schüler*innen erhalten dadurch die Möglichkeit, adäquate Vorstellungen aufzubauen, die auf der korrekten Interpretation unterschiedlicher Phänomene beruhen. Für die praktische Umsetzung eines solchen Konzepts können interaktive Experimentiervideos hilfreich sein.

Außerdem liefert die unterschiedliche Überzeugungskraft der hier untersuchten Experimente Hinweise, worauf bei der didaktischen Einbindung dieser Experimen-

8 Diskussion

te im Unterricht zu achten ist: Experimente, die anschauliche Phänomene zeigen, können zwar überzeugend wirken, es sollte jedoch sichergestellt werden, dass eben diese überzeugenden Beobachtungen nicht in unangemessener Weise auf das Teilchenmodell und seine Eigenschaften übertragen werden.

Ebenso bedeutsam sind die Erkenntnisse aus den Betrachtungen weiterer Variablen dieser Studie, allen voran der Zusammenhang zwischen der wahrgenommenen inhaltlichen Schwierigkeit der Experimente und der visuellen Komplexität ihres Aufbaus: Die Ergebnisse legen nahe, dass die Schüler*innen ihre Einschätzung der inhaltlichen Schwierigkeit auch von der visuellen Komplexität des Aufbaus abhängig machen. Da diese zwei Merkmale nicht nur Experimente zum Teilchenmodell betreffen, lässt sich dadurch generell die Bedeutsamkeit der verwendeten Geräte von Experimenten im naturwissenschaftlichen Unterricht hervorheben.

Literaturverzeichnis

- Alexander, P. A., Fives, H., Buehl, M. M. & Mulhern, J. (2002). Teaching as persuasion. *Teaching and Teacher Education*, 18(7), 795–813. [https://doi.org/10.1016/S0742-051X\(02\)00044-6](https://doi.org/10.1016/S0742-051X(02)00044-6)
- Bangor, A., Kortum, P. & Miller, J. (2009). Determining what individual SUS scores mean: adding an adjective rating scale. *Journal of Usability Studies*, 4(3), 114–123.
- Bathe, M., Bartelheimer, M. & Asshoff, R. (2021). Alltagsvorstellungen zum Platzen von Kirschen im Kontext der Modellkompetenz. *MNU*, (1), 50–53.
- Bentele, G., Brosius, H.-B. & Jarren, O. (Hrsg.). (2013). *Lexikon Kommunikations- und Medienwissenschaft*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-531-93431-0>
- Bernholt, S., Neumann, K. & Sumfleth, E. (2018). Learning Progressions. In D. Krüger, I. Parchmann & H. Schecker (Hrsg.), *Theorien in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung* (S. 209–225). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-56320-5_13
- Brooke, J. (1996). SUS: A „Quick and Dirty“ Usability Scale. In P.W. Jordan, B. Thomas, I.L. McClelland & B. Weerdmeester (Hrsg.), *Usability Evaluation In Industry* (S. 207–212). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781498710411-35>
- Budimaier, F. (2022). Experimente für den Unterricht über das Teilchenmodell. (M. Rost & A. Lembens, Hrsg.) *Plus Lucis*, (3), 12–15.
- Budimaier, F. & Hopf, M. (2024). Evaluation of a new teaching-learning sequence on the particulate nature of matter using crystal structures. *Physical Review Physics Education Research*, 20(2), 020104. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.20.020104>
- Bühner, M. & Ziegler, M. (2009). *Statistik für Psychologen und Sozialwissenschaftler* (PS Psychologie) (1. Auflage). München: Pearson.
- Carey, S. (2009). *The Origin of Concepts*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780195367638.001.0001>
- Carey, S. (2011). Précis of *The Origin of Concepts*. *Behavioral and Brain Sciences*, 34(3), 113–124. <https://doi.org/10.1017/S0140525X10000919>
- Chinn, C. A. & Iordanou, K. (2023). Theories of Learning. *Handbook of Research on Science Education: Volume III* (1. Auflage, S. 89–120). New York: Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780367855758>
- Chinn, C. A. & Samarapungavan, A. (2001). Distinguishing Between Understanding and Belief. *Theory Into Practice*, 40(4), 235–241. https://doi.org/10.1207/s15430421tip4004_4

- Dahncke, H., Götz, R. & Langensiepen, F. (Hrsg.). (1986). *Handbuch des Physikunterrichts. 3: Wärmelehre, Wetterkunde*. Köln: Aulis-Verl. Deubner.
- diSessa, A. A. (2018). A Friendly Introduction to “Knowledge in Pieces”: Modeling Types of Knowledge and Their Roles in Learning (ICME-13 Monographs). In G. Kaiser, H. Forgasz, M. Graven, A. Kuzniak, E. Simmt & B. Xu (Hrsg.), *Invited Lectures from the 13th International Congress on Mathematical Education* (S. 65–84). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-72170-5_5
- diSessa, A. A. (2022). A History of Conceptual Change Research: Threads and Fault Lines. In R.K. Sawyer (Hrsg.), *The Cambridge Handbook of the Learning Sciences* (3. Auflage, S. 114–133). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781108888295.008>
- Döring, N. (2023). *Forschungsmethoden und Evaluation in den Sozial- und Humanwissenschaften*. Berlin, Heidelberg: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-64762-2>
- Driver, R., Squires, A., Rushworth, P. & Wood-Robinson, V. (2015). *Making sense of secondary science: research into children’s ideas* (Routledge education classic edition series) (Classic edition.). London, New York: Routledge, Taylor & Francis Group.
- Duit, R. (2015). Alltagsvorstellungen und Physik lernen (Springer Lehrbuch). In E. Kircher, R. Girwidz & P. Häußler (Hrsg.), *Physikdidaktik: Theorie und Praxis* (3. Auflage., S. 657–680). Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum.
- Euler, M., Schüttler, T. & Hausamann, D. (2015). Schülerlabore: Lernen durch Forschen und Entwickeln (Springer-Lehrbuch). In E. Kircher, R. Girwidz & P. Häußler (Hrsg.), *Physikdidaktik* (S. 759–782). Berlin, Heidelberg: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-41745-0_26
- Falkenburg, B. (1993). Was ist ein Teilchen?: Bedeutungen eines fundamentalen physikalischen Konzepts. *Physikalische Blätter*, 49(5), 403–408. <https://doi.org/10.1002/phbl.19930490509>
- Feynman, R. P. & Davies, P. (2011). *Six easy pieces: essentials of physics explained by its most brilliant teacher*. New York: Basic Books, a member of the Perseus Books group.
- Field, A. (2013). *Discovering statistics using SPSS: (and sex and drugs and rock n’ roll)* (4. Auflage). Los Angeles: Sage Publications.
- Fischler, H., Götz, R., Schlosser, W., Schmidt, H., Schneider, E., Volkmer, M. et al. (1998). *Handbuch des Physikunterrichts. 8: Atom- und Kernphysik, Astronomie, Technikbezüge*. (R. Götz, H. Dahncke & F. Langensiepen, Hrsg.). Köln: Aulis-Verl. Deubner.

- Fischler, H. & Reiners, C. S. (2006). Teilchenmodelle im Physik- und Chemieunterricht (Studien zum Physik- und Chemielernen). In H. Fischler & C.S. Reiners (Hrsg.), *Die Teilchenstruktur der Materie im Physik- und Chemieunterricht* (Band 50, S. 5–25). Berlin: Logos.
- Fischler, H. & Rothenhagen, A. (1997). Experimente zum Teilchenmodell. (H. Fischler, Hrsg.) *Naturwissenschaften im Unterricht Physik*, 8(41), 27–33.
- Fischler, H. & Schecker, H. (2018). Schülervorstellungen zu Teilchen und Wärme. In H. Schecker, T. Wilhelm, M. Hopf & R. Duit (Hrsg.), *Schülervorstellungen und Physikunterricht: Ein Lehrbuch für Studium, Referendariat und Unterrichtspraxis*. Springer Spektrum.
- Flanagin, A. J. & Metzger, M. J. (2008). Digital Media and Youth: Unparalleled Opportunity and Unprecedented Responsibility (The John D. and Catherine T. MacArthur Foundation Series on Digital Media and Learning). In M.J. Metzger & A.J. Flanagin (Hrsg.), *Digital Media, Youth, and Credibility* (S. 5–28). Cambridge, MA: The MIT Press.
- Girwidz, R. (2015). Medien im Physikunterricht (Springer-Lehrbuch). In E. Kircher, R. Girwidz & P. Häußler (Hrsg.), *Physikdidaktik* (S. 193–245). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-41745-0_6
- Girwidz, R. (2020a). Experimente im Physikunterricht. In E. Kircher, R. Girwidz & H.E. Fischer (Hrsg.), *Physikdidaktik Grundlagen* (S. 263–291). Berlin, Heidelberg: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-59490-2_7
- Girwidz, R. (2020b). 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>
- Glatz, L. C., Erb, R. & Teichrow, A. (2020). Überzeugungskraft digitalisierter Experimente zum Teilchenmodell. In S. Habig (Hrsg.), *Naturwissenschaftliche Kompetenzen in der Gesellschaft von morgen. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Jahrestagung in Wien 2019* (S. 70–73). Universität Duisburg-Essen.
- 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. Zugriff am 11.6.2021. Verfügbar unter: <https://www.waxmann.com/index.php?eID=download&buchnr=4349#page=223>
- Glatz, L. C., Erb, R. & Teichrow, A. (2023). Experimente, die das Teilchenmodell überzeugend vermitteln. In H. van Vorst (Hrsg.), *Lernen, Lehren und Forschen in einer digital geprägten Welt* (S. 254–257). Gehalten auf der GDGP-Jahrestagung, Aachen. Verfügbar unter: https://gdcp-ev.de/wp-content/uploads/securepdfs/2023/07/Do7_Glatz.pdf

Literaturverzeichnis

- Glatz, L. C., Teichrew, A. & Erb, R. (2021). Assessing the Persuasiveness of Experiments on the Particle Model of Matter. In G.S. Carvalho, A.S. Afonso & Z. Anastácio (Hrsg.), *Fostering scientific citizenship in an uncertain world (Proceedings of ESERA 2021)* (Band 1, S. 37–44). Braga: CIEC, University of Minho. Verfügbar unter: https://www.esera.org/wp-content/uploads/2023/02/CNF21-Proceedings_Strand-1_p.4-89.pdf
- Hadenfeldt, J. C. & Neumann, K. (2012). Die Erfassung des Verständnisses von Materie durch Ordered Multiple Choice Aufgaben. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 18, 317–338.
- Hadenfeldt, J. C., Neumann, K., Bernholt, S., Liu, X. & Parchmann, I. (2016). Students' progression in understanding the matter concept: STUDENTS' PROGRESSION IN UNDERSTANDING MATTER. *Journal of Research in Science Teaching*, 53(5), 683–708. <https://doi.org/10.1002/tea.21312>
- Harrison, A. G. & Treagust, D. F. (2006). Particles and Matter: Problems in Learning about the Submicroscopic World (Studien zum Physik- und Chemielernen). In H. Fischler & C.S. Reiners (Hrsg.), *Die Teilchenstruktur der Materie im Physik- und Chemieunterricht* (Band 50, S. 53–75). Berlin: Logos.
- Hasselhorn, M. & Gold, A. (2022). *Pädagogische Psychologie: erfolgreiches Lernen und Lehren* (Standards Psychologie) (5., überarbeitete Auflage.). Stuttgart: Verlag W. Kohlhammer.
- Hessisches Kultusministerium. (2011). *Bildungsstandards und Inhaltsfelder - Das neue Kerncurriculum für Hessen. Sekundarstufe I - Gymnasium PHYSIK*. Wiesbaden. Zugriff am 3.6.2023. Verfügbar unter: https://kultusministerium.hessen.de/sites/kultusministerium.hessen.de/files/2021-07/kerncurriculum_physik_gymnasium.pdf
- Horz, H. (2020). Medien. In E. Wild & J. Möller (Hrsg.), *Pädagogische Psychologie* (S. 133–159). Berlin, Heidelberg: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-61403-7_6
- Höttecke, D. & Rieß, F. (2015). Naturwissenschaftliches Experimentieren im Lichte der jüngeren Wissenschaftsforschung – Auf der Suche nach einem authentischen Experimentbegriff der Fachdidaktik. *ZfDN*, 21(1), 127–139. <https://doi.org/10.1007/s40573-015-0030-z>
- Kircher, E., Girwidz, R. & Häußler, P. (Hrsg.). (2015). *Physikdidaktik: Theorie und Praxis* (Springer Lehrbuch) (3. Auflage.). Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum.
- Kirstein, J. & Nordmeier, V. (2023). Interaktive Bildschirmexperimente im Unterricht einsetzen. In T. Wilhelm (Hrsg.), *Digital Physik unterrichten. Grundlagen, Impulse und Perspektiven* (S. 71–96). Hannover: Klett Kallmeyer. Verfügbar unter: <https://www.friedrich-verlag.de/shop/digital-physik-unterrachten-31700>
- 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 13.5.2021.
Verfügbar unter:
https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen_beschluesse/2004/2004_12_16-Bildungsstandards-Physik-Mittleren-SA.pdf
- Krajcik, J. & Shin, N. (2023). Student Conceptions, Conceptual Change, and Learning Progressions. *Handbook of Research on Science Education: Volume III* (1. Auflage, S. 121–157). New York: Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780367855758>
- Laumann, D. & Hoyer, C. (2023). Mit Simulationen experimentieren. In T. Wilhelm (Hrsg.), *Digital Physik unterrichten. Grundlagen, Impulse und Perspektiven* (S. 119–139). Hannover: Klett Kallmeyer. Verfügbar unter: <https://www.friedrich-verlag.de/shop/digital-physik-unterrachten-31700>
- Leppink, J., Paas, F., Van der Vleuten, C. P. M., Van Gog, T. & Van Merriënboer, J. J. G. (2013). Development of an instrument for measuring different types of cognitive load. *Behavior Research Methods*, 45(4), 1058–1072.
<https://doi.org/10.3758/s13428-013-0334-1>
- Lichtfeldt, M. (1992). *Schülervorstellungen in der Quantenphysik und ihre möglichen Veränderungen durch Unterricht: eine empirische Untersuchung in d. Sekundarstufe II* (Naturwissenschaft und Unterricht - Didaktik im Gespräch). Essen: Westarp-Wiss.
- Lindlahr, W. (2022). *Virtual-Reality-Experimente: Entwicklung und Evaluation eines Konzepts für den forschend-entwickelnden Physikunterricht mit digitalen Medien* (Studien zum Physik- und Chemielernen) (Band 349). Berlin: Logos.
- Ludwig, T. (2017). Argumentieren beim Experimentieren in der Physik - Die Bedeutung personaler und situationaler Faktoren. <https://doi.org/10.18452/18408>
- Mayer, R. E. (2021). Cognitive Theory of Multimedia Learning. In R.E. Mayer & L. Fiorella (Hrsg.), *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning* (3. Auflage, S. 57–72). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781108894333.008>
- McKagan, S. B., Perkins, K. K. & Wieman, C. E. (2008). Why we should teach the Bohr model and how to teach it effectively. *Physical Review Special Topics - Physics Education Research*, 4(1), 010103. <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.4.010103>
- Meier, M., Kastaun, M. & Stinken-Rösner, L. (2022). Experimentiervideos im naturwissenschaftlichen Unterricht – Lehren und Lernen mit und durch VidEX. In E.M. Watts & C. Hoffmann (Hrsg.), *Digitale NAWI-gation von Inklusion* (S. 51–65). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-37198-2_5
- Mézes, C., Erb, R. & Schröter, E. (2012). Der Einfluss von Videoexperimentieranleitungen auf die Motivation von Schülerinnen und Schülern. *PhyDid A - Physik und Didaktik in Schule und Hochschule*, 11(1), 17–27.

- Mikelskis-Seifert, S. (2006). Lernen über Modelle: Entwicklung und Evaluation einer Konzeption für die Einführung des Teilchenmodells (Studien zum Physik- und Chemielernen). In H. Fischler & C.S. Reiners (Hrsg.), *Die Teilchenstruktur der Materie im Physik- und Chemieunterricht* (S. 165–198). Berlin: Logos Berlin.
- Murphy, P. K. (2001). Teaching as Persuasion: A New Metaphor for a New Decade. *Theory Into Practice*, 40(4), 224–227.
- Özdemir, G. & Clark, D. B. (2007). An Overview of Conceptual Change Theories. *EURASIA Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 3(4). <https://doi.org/10.12973/ejmste/75414>
- Paas, F. & Sweller, J. (2021). Implications of Cognitive Load Theory for Multimedia Learning. In R.E. Mayer & L. Fiorella (Hrsg.), *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning* (3. Auflage, S. 73–81). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781108894333.009>
- Perkins, K., Adams, W., Dubson, M., Finkelstein, N., Reid, S., Wieman, C. et al. (2006). PhET: Interactive Simulations for Teaching and Learning Physics. *The Physics Teacher*, 44(1), 18–23. <https://doi.org/10.1119/1.2150754>
- Petty, R. E. & Cacioppo, J. T. (2018). *Attitudes and persuasion: classic and contemporary approaches*. New York, NY: Routledge.
- Petty, R. E., Rucker, D. D., Bizer, G. Y. & Cacioppo, J. T. (2004). The Elaboration Likelihood Model of Persuasion. In J.S. Seiter & R.H. Gass (Hrsg.), *Perspectives on persuasion, social influence, and compliance gaining* (S. 65–89). Boston: Pearson Allyn and Bacon.
- Petty, R. E. & Wegener, D. T. (1999). The Elaboration Likelihood Model: Current Status and Controversies (Dual-process theories in social psychology.). *Dual-process theories in social psychology*. (S. 41–72). New York, NY, US: The Guilford Press.
- Peuckert, J. (2006). Stabilität und Ausprägung von Teilchenvorstellungen (Studien zum Physik- und Chemielernen). In H. Fischler & C.S. Reiners (Hrsg.), *Die Teilchenstruktur der Materie im Physik- und Chemieunterricht* (Band 50, S. 77–105). Berlin: Logos.
- Pfundt, H. (1981). Das Atom - letztes Teilungsstück oder erster Aufbaustein? (P. Buck & W. Dahlmann, Hrsg.) *chimica didactica*, 7(2), 75–94.
- Potvin, P., Nenciovici, L., Malenfant-Robichaud, G., Thibault, F., Sy, O., Mahhou, M. A. et al. (2020). Models of conceptual change in science learning: establishing an exhaustive inventory based on support given by articles published in major journals. *Studies in Science Education*, 56(2), 157–211. <https://doi.org/10.1080/03057267.2020.1744796>
- Rehm, M. & Buck, P. (2006). Der Teil und das Ganze - ein Lehr-Lern-Arrangement vor der Einführung von Atommodellen (Studien zum Physik- und Chemielernen). In

- H. Fischler & C.S. Reiners (Hrsg.), *Die Teilchenstruktur der Materie im Physik- und Chemieunterricht* (Band 50, S. 145–162). Berlin: Logos.
- Rehm, M. & Parchmann, I. (2009). Die Welt der Atome - eine Frage ohne eindeutige Antwort. *NiU Chemie*, 20(114), 2–4.
- Renkl, A. (2020). Wissenserwerb. *Pädagogische Psychologie* (S. 3–24). Berlin, Heidelberg: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-61403-7>
- Riegel, S. (2018). Sieht man die Molekularbewegung im Wasserglas? In T. Wilhelm (Hrsg.), *Stolpersteine überwinden im Physikunterricht. Anregungen zu fachgerechten Elementarisierungen* (S. 83–85). Aulis Verlag [in Friedrich Verlag GmbH].
- Rieh, S. Y. & Danielson, D. R. (2007). Credibility: A multidisciplinary framework. *Annual Review of Information Science and Technology*, 41(1), 307–364. <https://doi.org/10.1002/aris.2007.1440410114>
- Schecker, H., Wilhelm, T., Hopf, M. & Duit, R. (Hrsg.). (2018). *Schülervorstellungen und Physikunterricht: Ein Lehrbuch für Studium, Referendariat und Unterrichtspraxis*. Springer Spektrum.
- Smith, C. L. (2007). Bootstrapping Processes in the Development of Students' Commonsense Matter Theories: Using Analogical Mappings, Thought Experiments, and Learning to Measure to Promote Conceptual Restructuring. *Cognition and Instruction*, 25(4), 337–398. <https://doi.org/10.1080/07370000701632363>
- Stinken-Rösner, L. (2020). Simulations in Science Education – Status Quo. *Progress in Science Education (PriSE)*, 26–34. <https://doi.org/10.25321/PRISE.2020.996>
- Stinken-Rösner, L., Weidenhiller, P., Nerdel, C., Weck, H., Kastaun, M. & Meier, M. (2023). Inklusives Experimentieren im naturwissenschaftlichen Unterricht digital unterstützen. In D. Ferencik-Lehmkuhl, I. Huynh, C. Laubmeister, C. Lee, C. Melzer, I. Schwank et al. (Hrsg.), *Inklusion digital! Chancen und Herausforderungen inklusiver Bildung im Kontext von Digitalisierung* (S. 152–167). Verlag Julius Klinkhardt. <https://doi.org/10.35468/5990-11>
- Sweller, J. (2010). Element Interactivity and Intrinsic, Extraneous, and Germane Cognitive Load. *Educational Psychology Review*, 22(2), 123–138. <https://doi.org/10.1007/s10648-010-9128-5>
- Sweller, J. & Chandler, P. (1994). Why Some Material Is Difficult to Learn. *Cognition and Instruction*, 12(3), 185–233. https://doi.org/10.1207/s1532690xcii203_1
- Sweller, J., van Merriënboer, J. J. G. & Paas, F. G. W. C. (1998). Cognitive Architecture and Instructional Design. *Educational Psychology Review*, 10(3), 251–296. <https://doi.org/10.1023/A:1022193728205>

- Teichrew, A. (2023a). *Physikalische Modellbildung mit dynamischen Modellen* (Studien zum Physik- und Chemielernen) (Band 364). Berlin: Logos.
- Teichrew, A. (2023b). In Virtual und Augmented Reality experimentieren. In T. Wilhelm (Hrsg.), *Digital Physik unterrichten. Grundlagen, Impulse und Perspektiven* (S. 177–191). Hannover: Klett Kallmeyer. Verfügbar unter: <https://www.friedrich-verlag.de/shop/digital-physik-unterrichten-31700>
- Teichrew, A. & Erb, R. (2020). 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>
- Tesch, M. (2005). *Das Experiment im Physikunterricht. Didaktische Konzepte und Ergebnisse einer Videostudie* (Studien zum Physik- und Chemielernen) (Band 42). Berlin: Logos.
- Thees, M., Kapp, S., Strzys, M. P., Beil, F., Lukowicz, P. & Kuhn, J. (2020). Effects of augmented reality on learning and cognitive load in university physics laboratory courses. *Computers in Human Behavior*, 108, 106316. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2020.106316>
- de Vos, W. & Verdonk, A. H. (1996). The Particulate Nature of Matter in Science Education and in Science. *Journal of Research in Science Teaching*, 33(6), 657–664. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1098-2736\(199608\)33:6<657::AID-TEA4>3.0.CO;2-N](https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-2736(199608)33:6<657::AID-TEA4>3.0.CO;2-N)
- Vosniadou, S. (2013a). Conceptual Change Research: An Introduction. *International Handbook of Research on Conceptual Change* (2nd ed., S. 1–7). Hoboken: Taylor and Francis.
- Vosniadou, S. (2013b). Conceptual Change in Learning and Instruction: The Framework Theory Approach. *International Handbook of Research on Conceptual Change* (2nd ed., S. 11–30). Hoboken: Taylor and Francis.
- Wiener, G. J., Schmeling, S. M. & Hopf, M. (2017). Introducing 12 year-olds to elementary particles. *Physics Education*, 52(4), 1–8. <https://doi.org/10.1088/1361-6552/aa6cfe>
- Wilke, H.-J. (Hrsg.). (1997). *Physikalische Schulexperimente. Band 1 Mechanik/Thermodynamik* (1. Auflage). Volk und Wissen Verlag GmbH.
- Wiser, M. & Smith, C. L. (2013). Learning and Teaching about Matter in the Middle-School Years: How Can the Atomic-Molecular Theory be Meaningfully Introduced? *International Handbook of Research on Conceptual Change* (2nd ed., S. 177–194). Hoboken: Taylor and Francis.
- Wiser, M. & Smith, C. L. (2016). How Is Conceptual Change Possible? Insights from Science Education. In D. Barner & A.S. Baron (Hrsg.), *Core Knowledge and Conceptual Change* (S. 29–52). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780190467630.003.0003>

Zumbach, J. (2010). *Lernen mit Neuen Medien: instruktionspsychologische Grundlagen* (Kohlhammer Standards Psychologie) (1. Auflage.). Stuttgart: Verlag W. Kohlhammer.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Modellhafte Darstellung der CTML, angepasst nach Mayer (2021), übersetzt nach Horz (2020)	18
Abbildung 2:	Modellhafte Darstellung des ELM of Persuasion nach Petty, Rucker, Bizer, & Cacioppo, 2004, original erschienen in Petty & Cacioppo, 1986	27
Abbildung 3:	Erkenntnisgewinnung mithilfe von Modellen nach Mikelskis-Seifert (2006)	35
Abbildung 4:	Klassifikation von Modellen, angepasst nach Mikelskis-Seifert (2006)	36
Abbildung 5:	Kreislauf der Erkenntnisgewinnung nach Teichrew (2023a)	37
Abbildung 6:	Dimensionen des Experimentierens nach Tesch (2005)	45
Abbildung 7:	Funktionale Aspekte von Experimenten nach Girwidz (2020)	46
Abbildung 8:	Bildschirmfoto aus dem interaktiven Experimentiervideo <i>Elektrolyse mit Knallgasreaktion</i>	65
Abbildung 9:	Interaktion <i>Hypothesenwahl</i> aus dem interaktiven Experimentiervideo <i>Farbstoff in Wasser</i>	66
Abbildung 10:	Bildschirmfoto aus dem interaktiven Experimentiervideo <i>Partikel in der Rauchkammer</i>	67
Abbildung 11:	Schematische Übersicht der Intervention	69
Abbildung 12:	Beispiel eines OMC-Items nach Hadenfeldt et al. (2014)	71
Abbildung 13:	Verschiedene Ratingskalen zum SUS nach Bangor et al. (2009) ..	81
Abbildung 14:	Prozentuale Verteilung der Entwicklungen der Modellaussagenauswahlen in der Pilotierung	85
Abbildung 15:	Prozentuale Verteilung der Entwicklungen der Modellaussagenauswahlen in der Haupterhebung	95
Abbildung 16:	Entwicklungen der Modellaussagenauswahlen der Schüler*innen, die vor der Experimentdurchführung eine falsche Aussage gewählt haben	96
Abbildung 17:	Erklärung der verwendeten Sankey-Diagramme	108
Abbildung 18:	Modellaussagenentwicklungen der zwei als überzeugend eingestuften Experimente	108
Abbildung 19:	Modellaussagenentwicklungen der zwei als wenig überzeugend eingestuften Experimente	109
Abbildung 20:	Modellaussagenentwicklungen der Experimente <i>Ölfleckversuch</i> und <i>Bilden und Lösen von Salzkristallen</i>	111
Abbildung 21:	Modellaussagenentwicklungen der zwei Experimente <i>Feldemissionsmikroskop</i> und <i>Gesetz der konstanten Proportionen</i>	111

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Auszug aus den Designprinzipien nach Mayer (2021), eigene Übersetzung.....	21
Tabelle 2:	Fachdidaktische (1 – 4) und mediendidaktische (5 – 7) Strukturelemente der interaktiven Experimentiervideos.	64
Tabelle 3:	Die acht Experimente mit dazugehörigen Aspekten des Teilchenmodells	73
Tabelle 4:	Alternative Modellaussagen und dazugehörige Experimente	74
Tabelle 5:	Alternative Modellaussagen und dazugehörige Experimente (Fortsetzung)	75
Tabelle 6:	Skala <i>Daten als Evidenz</i> von Ludwig (2017)	75
Tabelle 7:	Skala <i>Intuition</i> von Ludwig (2017)	76
Tabelle 8:	Verwendete ICL-Items	77
Tabelle 9:	Eingeschätzte kognitive Beanspruchung der Experimente in steigender Reihenfolge.....	78
Tabelle 10:	Eingeschätzte Komplexität des Aufbaus in steigender Reihenfolge	80
Tabelle 11:	Items zum wahrgenommenen Aufbau der Experimente	80
Tabelle 12:	SUS in original und verwendeter Übersetzung.....	82
Tabelle 13:	Die vier in der Pilotierung eingesetzten Experimente	84
Tabelle 14:	Deskriptive Statistiken der abhängigen Variable <i>Beobachtungen</i> (n = 42) in steigender Reihenfolge.....	86
Tabelle 15:	Deskriptive Statistiken der abhängigen Variable <i>Intuition</i> (n = 42) in steigender Reihenfolge	86
Tabelle 16:	Deskriptive Statistiken der abhängigen Variable <i>ICL</i> (n = 41) in steigender Reihenfolge.....	87
Tabelle 17:	Interaktive Experimentiervideos und deren Mindestlängen	92
Tabelle 18:	Konzepttestergebnisse	94
Tabelle 19:	Häufigkeiten der engagiert bearbeiteten interaktiven Experimentiervideos	94
Tabelle 20:	Mittelwerte der angegebenen Sicherheit der Modellaussagenauswahlen	97
Tabelle 21:	Häufigkeiten der kategorisierten Begründungen	99
Tabelle 22:	Deskriptive Statistiken der abhängigen Variable <i>Beobachtungen</i> (n = 46) in steigender Reihenfolge.....	101
Tabelle 23:	Deskriptive Statistiken der abhängigen Variable <i>Intuition</i> (n = 46) in steigender Reihenfolge	102
Tabelle 24:	Deskriptive Statistiken der abhängigen Variable <i>ICL</i> (n = 45) in steigender Reihenfolge.....	103

Tabellenverzeichnis

Tabelle 25:	Paarweise Vergleiche durchschnittlicher ICL-Werte. Die Unter- und Obergrenze beziehen sich auf das 95%-Konfidenzintervall für die Differenz.	103
Tabelle 26:	Mittelwertergebnisse des Items „Bei dem Experiment wurden überwiegend Gegenstände verwendet, die ich aus meinem Alltag kenne“, in steigender Reihenfolge.....	104
Tabelle 27:	Mittelwertergebnisse des Items „Die Geräte, die im Experiment benutzt wurden, gibt es überwiegend an einer Schule oder Universität“, in steigender Reihenfolge	105
Tabelle 28:	Hypothesen und dazugehörige Entscheidungen	116
Tabelle 29:	Itemtrennschärfe (rit) und Konsistenzkoeffizient, wenn Item weggelassen (Cronbachs α), der Skala <i>Beobachtungen für Partikel in der Rauchkammer</i>	137
Tabelle 30:	Itemtrennschärfe (rit) und Konsistenzkoeffizient, wenn Item weggelassen (Cronbachs α), der Skala <i>Beobachtungen für die restlichen Experimente</i>	137
Tabelle 31:	Itemtrennschärfe (rit) und Konsistenzkoeffizient, wenn Item weggelassen (Cronbachs α), der Skala <i>Intuition für Partikel in der Rauchkammer</i>	138
Tabelle 32:	Itemtrennschärfe (rit) und Konsistenzkoeffizient, wenn Item weggelassen (Cronbachs α), der Skala <i>Intuition für die restlichen Experimente</i>	138
Tabelle 33:	Itemtrennschärfe (rit) und Konsistenzkoeffizient, wenn Item weggelassen (Cronbachs α), der Skala <i>ICL für Partikel in der Rauchkammer</i>	139
Tabelle 34:	Itemtrennschärfe (rit) und Konsistenzkoeffizient, wenn Item weggelassen (Cronbachs α), der Skala <i>ICL für die restlichen Experimente</i>	139
Tabelle 35:	Itemtrennschärfe (rit) und Konsistenzkoeffizient, wenn Item weggelassen (Cronbachs α), der Skala <i>System Usability</i>	140

Anhang

Tabelle 29: Itemtrennschärfe (r_{it}) und Konsistenzkoeffizient, wenn Item weggelassen (Cronbachs α), der Skala *Beobachtungen* für *Partikel in der Rauchkammer*

		RA	
Nr.	Item	r_{it}	α
1	Meine Beobachtungen sind der Grund, warum ich meine Vermutung verwerfe/beibehalte.	.54	.75
2	Meine Entscheidung, die Vermutung beizubehalten/zu verwerfen ist eine Reaktion auf meine Beobachtungen.	.57	.74
3	Um für mich diese Entscheidung zum Beibehalten/Verwerfen meiner Vermutung zu begründen, denke ich besonders intensiv über meine Beobachtungen nach.	.57	.74
4	Die Beobachtungen spielen bei meiner Entscheidung die größte Rolle.	.59	.74
5	Die Auswertung meiner Beobachtungen ist der Grund für meine Entscheidung zum Beibehalten/Wechseln meiner Vermutung.	.55	.75

Tabelle 30: Itemtrennschärfe (r_{it}) und Konsistenzkoeffizient, wenn Item weggelassen (Cronbachs α), der Skala *Beobachtungen* für die restlichen Experimente

Nr.	FA		EK		ES		SK		FE		OL		KP	
	r_{it}	α	r_{it}	α	r_{it}	α	r_{it}	α	r_{it}	α	r_{it}	α	r_{it}	α
1	.68	.80	.77	.81	.67	.73	.67	.77	.64	.76	.64	.80	.63	.70
2	.64	.82	.72	.82	.55	.77	.66	.78	.48	.80	.69	.79	.47	.75
3	.53	.84	.65	.84	.55	.77	.48	.83	.66	.75	.58	.82	.46	.76
4	.69	.80	.72	.82	.55	.77	.68	.77	.55	.79	.61	.81	.58	.72
5	.72	.79	.54	.87	.58	.76	.61	.79	.65	.75	.67	.79	.59	.71

Tabelle 31: Itemtrennschärfe (r_{it}) und Konsistenzkoeffizient, wenn Item weggelassen (Cronbachs α), der Skala *Intuition* für *Partikel in der Rauchkammer*

		RA	
Nr.	Item	r_{it}	α
1	Ich höre stark auf mein Bauchgefühl, wenn ich aus dem Experiment Schlüsse ziehe.	.80	.87
2	Bei der Entscheidung berücksichtige ich stark mein Gefühl.	.76	.88
3	Bei meiner Entscheidung spielen Gefühle eine große Rolle.	.69	.89
4	Ich habe mich gefühlsmäßig für die Antwort entschieden, die mir am meisten zusagt.	.72	.89
5	Bei dieser Entscheidung habe ich mich ganz auf mein Gefühl verlassen.	.80	.87

Tabelle 32: Itemtrennschärfe (r_{it}) und Konsistenzkoeffizient, wenn Item weggelassen (Cronbachs α), der Skala *Intuition* für die restlichen Experimente

Nr.	FA		EK		ES		SK		FE		OL		KP	
	r_{it}	α	r_{it}	α	r_{it}	α	r_{it}	α	r_{it}	α	r_{it}	α	r_{it}	α
1	.69	.80	.74	.83	.67	.86	.73	.87	.77	.85	.73	.87	.56	.80
2	.70	.80	.69	.84	.75	.84	.77	.85	.74	.85	.80	.85	.70	.76
3	.63	.82	.75	.83	.75	.84	.64	.88	.76	.85	.77	.86	.55	.81
4	.51	.85	.60	.86	.58	.88	.75	.86	.63	.88	.74	.87	.63	.78
5	.73	.79	.69	.84	.78	.83	.75	.86	.70	.86	.64	.89	.65	.78

Tabelle 33: Itemtrennschärfe (r_{it}) und Konsistenzkoeffizient, wenn Item weggelassen (Cronbachs α), der Skala *ICL* für *Partikel in der Rauchkammer*

Nr.	Item	RA	
		r_{it}	α
1	Das Themengebiet des Experiments empfinde ich als sehr schwierig.	.74	.88
2	Das Deuten der Beobachtungen habe ich als sehr schwierig empfunden.	.73	.88
3	Die Interaktionen beim Experimentieren habe ich als sehr schwierig empfunden.	.80	.85
4	Die beim Experimentieren betrachteten physikalischen/chemischen Zusammenhänge habe ich als sehr schwierig empfunden.	.81	.85

Tabelle 34: Itemtrennschärfe (r_{it}) und Konsistenzkoeffizient, wenn Item weggelassen (Cronbachs α), der Skala *ICL* für die restlichen Experimente

Nr.	FA		EK		ES		SK		FE		OL		KP	
	r_{it}	α	r_{it}	α	r_{it}	α	r_{it}	α	r_{it}	α	r_{it}	α	r_{it}	α
1	.72	.85	.64	.84	.76	.89	.72	.85	.71	.82	.79	.90	.72	.81
2	.84	.81	.72	.81	.81	.88	.79	.82	.69	.83	.85	.88	.70	.82
3	.70	.86	.71	.81	.80	.88	.74	.84	.70	.82	.81	.90	.74	.80
4	.71	.86	.73	.81	.80	.88	.70	.86	.71	.82	.81	.90	.65	.84

Tabelle 35: Itemtrennschärfe (r_{it}) und Konsistenzkoeffizient, wenn Item weggelassen (Cronbachs α), der Skala *System Usability*

Nr.	Item	r_{it}	α
1	Ich glaube ich würde dieses digitale Medium gerne häufig verwenden.	.65	.84
2	Ich empfand das digitale Medium als unnötig komplex.	.50	.86
3	Ich finde das digitale Medium war leicht zu bedienen.	.62	.85
4	Ich glaube ich würde die Unterstützung von einer technisch erfahrenen Person brauchen, um dieses digitale Medium benutzen zu können.	.57	.85
5	Ich fand die verschiedenen Funktionen dieses digitalen Mediums gut integriert.	.55	.85
6	Ich finde in dem digitalen Medium gab es zu viele Unstimmigkeiten.	.67	.84
7	Ich denke, dass die meisten Leute sehr schnell lernen würden, dieses digitale Medium zu benutzen.	.50	.86
8	Ich empfand das digitale Medium als sehr mühselig zu bedienen.	.64	.84
9	Ich habe mich in der Bedienung des digitalen Mediums sehr sicher gefühlt.	.66	.84
10	Ich musste viele Dinge lernen, bevor ich mit dem digitalen Medium loslegen konnte.	.41	.86

Begründungen für eine hohe Sicherheit mit der Modellaussagenauswahl nach *Partikel in der Rauchkammer*¹⁵

Kategorie 1

- [illegible]

¹⁵ Alle ab hier aufgelisteten Begründungen sind unverändert aus den Fragebogenantworten der Schüler*innen übernommen und auch nicht auf Tippfehler korrigiert.

Anhang

- Weil ich es eh schon gedacht hatte und der Versuch meinen Verdacht bestätigt hat und es da auch in der Auswertung stand
- Ich habe mich doch für die zweite Aussage entschieden da das Video mir die Sicherheit dafür geboten hat
- Man hat im Video gesehen dass die kleinen Rauchpartikel sich bewegt haben
- Wegen dem Versuch
- Wegen des Videos
- wie man es im Video sehen konnte bewegen sich die Partikel im Rauch und damit die Teilchen
- Da es im Versuch so erklärt wurde
- Da sich meine Vermutung bewahrheitet hat
- Durch den Laserpointer wurde sichtbar wie sich die einzelnen Rauchpartikel oder Teilchen in ständiger Bewegung waren, und das auch noch unregelmäßig.
- Hab das Video gesehen
- Beobachtung
- Ich bin wegen dem Versuch davon überzeugt.
- es gab die Lösung quasi in dem Video
- Ich habe das Experiment gut beobachtet und dadurch meine Vermutung aufgestellt.
- Die Beobachtung deutete dies
- Wegen dem Video
- da es so in dem Video erklärt wurde.
- weil es im Video deutlich erklärt wurde. UND WEIL ICH SCHLAU BIN
HAHAHAHAH
- Habe ich im Versuch gesehen, weil ich ein Genie bin!
- Das Video hat meine Vermutung unterstützt.
- Da ich mithilfe des Mikroskops gesehen habe, dass die Teilchen in Bewegung sind
- Im Versuch hat man gesehen wie die einzelnen Rauchpartikel sich ständig bewegt haben

Kategorie 2

- habe gelernt
- Unterricht
- Weil ich jetzt weiß, dass Materie aus kleinen Teilchen besteht, die ständig in Bewegung sind

Kategorie 3

- Ich denke halt dass das richtig ist.

Begründungen für eine niedrige Sicherheit mit der Modellaussagenauswahl nach *Partikel in der Rauchkammer*

Kategorie 1

- ich denke dass das so ist, da die Teilchen, in dem experiment was ich gerade gesehen habe, die Teilchen sich ständig bewegt haben aber ich bin mir nicht sicher.
- Video nicht verständlich
- Ich sehe keinen Zusammenhang von dem Video und der Frage.
- Ich finde mir hat das Video persönlich nicht viel weiter geholfen da ich den Ablauf nicht ganz verstanden und nachvollziehen konnte
- Ich habe das Video nicht verstanden
- hab ehrlich gesagt das video nicht richtig verstanden

Kategorie 3

- ICH HABE NICHT VERSTANDEN
- Wenig verstanden
- Ich habe geraten weil ich es nicht so ganz verstanden habe

Begründungen für eine hohe Sicherheit mit der Modellaussagenauswahl nach *Farbstoff in Wasser*

Kategorie 1

- weil ich das video angeschaut habe
- Die Teilchen im Video haben sich "selbstständig" im Wasser verteilt, ohne andere Einflüsse wie Erhitzung oder Durchmischen (Bewegungen).
- da die Teilchen sich ständig bewegen, vermischen sie sich miteinander. Zum Beispiel Wasser vermischt sich mit Farbe da beides flüssig ist und durch ständige bewegung sie aneinander stößen. deswegen bin ich mir ziemlich sicher.
- Aus dem Versuch habe ich heraus genommen, das sich Stoffe nach einiger Zeit gleichmässig verteilen.
- Ich bin mir vollkommen sicher, da beim Versuch mit dem Wasser, sich der Farbstoff auch langsam mit dem Wasser vermischt hat und nicht nur unten geblieben ist
- Ich bin mir weiterhin ziemlich sicher, weil ich denke, dass das die Tinte gezeigt hat. Und natürlich weil Baum.
- Meine Kenntnisse haben sich durch das kurze aber dennoch sehr informationsreichem Video erweitert. Danke!
- Ich bin mir ziemlich sicher, weil die Flüssigkeit sich nach und nach mit dem Wasser vermischt hat.
- Nachdem ich das Video gesehen habe, wurden meine Kenntnisse in diesem Themenbereich erweitert.

Anhang

- Video...
- Der Farbstoff hat sich nach einer Zeit mit dem Wasser vermischt ohne dass man ihn umgerührt hat.
- Nach diesem aufschlussreichen Video, konnte ich meine Kenntnisse nochmal wiederlegen.
- Im Video habe ich vieles verstehen können weshalb ich mir bei Antwort der Frage sicherer war.
- Sehr geehrter Lion Corneluis Glatz, Ich bin mir mit dieser Aussage ziemlich sicher, da ich das Video sehr gut verstanden habe und der Meinung bin es richtig verstanden zu haben. Liebe Grüße
- Video wurde gut verstanden
- Anhand dieses Experiments konnte man erkennen, dass die Teilchen eines z.B. flüssigen Stoffes (wie im Experiment) in ständiger Bewegung sind und deswegen sich auch selbst, ohne andere Einflüsse, im Raum verteilen/vermischen können.
- Das Video hat es veranschaulicht
- Video
- Da im Versuch der Farbstoff sich langsam verteilt hat ohne äußeren Einflüsse
- Durch die Erkenntnisse des Videos.
- Da ich das Video geguckt habe.
- Ich habe das so gewählt wegen dem video
- As we saw in the video, the dye started to mix with the water without any other influence from us, so we can conclude particles move of their own accord despite it being very slow
- siehe Video
- Meine Vorkenntnisse haben sich bestätigt
- Weil es am Versuch gezeigt wurde, dass sich Gase und Flüssigkeiten selbständig bewegen, also nicht immer am gleichen Platz bleiben.
- Man hat im Video gesehen dass der Farbstoff sich gleichmäßig verteilt hat. Mit freundlichen Grüßen, LUMA27
- wie wir auch in dem video schon gesehen haben hat es sich von selber mit dem farbstoff vermischt ohne das wir eingreifen mussten. so sieht man das sich die teilchen von selber bewegen können auch wenn dies nur sehr langsam geschieht.
- Durch das Video
- Im Video wurde gezeigt, dass sich der Farbstoff über den Zeitraum von 5 Tagen von alleine im Wasser verteilt hat, ohne, dass umgerührt wurde.
- In dem Video wurde gezeigt, dass nur durch das Einfüllen der farbigen Flüssigkeit und die dadurch entstandenen Aufwirbelungen, die Teilchen der Farbe sich mit dem Wasser vermischt haben. Gäbe es keine äußeren Einwirkungen, würden sich die Teilchen entweder gar nicht oder nur sehr sehr langsam vermischen.

- Durch den Versuch hab ich gesehen ,dass es sich im Laufe der Zeit sich die andere Substanz sich mit dem Wasser vermischt
- Video
- Nachdem Video hat man mehr Wissen gesammelt
- Weil ich es wegen der Auswertung denke.
- Das Video hat mich bestätigt
- Weil es im Video gezeigt wurde
- Weil man im Video sehen konnte, dass sich die Farbe mit dem Wasser vermischt ohne zu rühren.
- Aus dem Video
- Im Video verhält sich der blaue Farbstoff im Wasser so.
- Aufgrund der Beobachtung
- Aus dem Versuch im Video kann man schließen, dass sich Teilchen in Gasen und Flüssigkeiten gleichmäßig verteilen
- Wegen diesem Video.

Kategorie 2

- Durch die Eigenbewegung der Teilchen
- Unterricht
- weil die Materialien solange sie nicht im festen Zustand sind in einer ständigen Bewegung sind
- Weil die Teilchen sich wenn auch nach einer längeren Zeit gleichmäßig im Raum verteilen
- Wir hatten das in Chemie und der Versuch im Lernvideos beweist es auch

Kategorie 3

- ich glaube ich bin mir sicher
- ich glaub es einfach
- ich bin mir immernoch sehr sicher mit der Entscheidung jedoch verstehe ich nicht was die Frage mit dem Video zutun hat und warum es so lange dauert und bei zum Beispiel einem Tee schneller geht.
- einf so

Begründungen für eine niedrige Sicherheit mit der Modellaussagenauswahl nach *Farbstoff in Wasser*

Kategorie 1

- Weil ich eine Person bin die länger braucht um etwas zu verstehen und ein 2 Min Video vielleicht nicht genug ist.
- Ich habe die Zusammenhänge des Videos nicht so richtig verstanden.
- In dem Video wurde nie das Wort "Materie" erwähnt, also woher soll ich wissen, was das ist???

Anhang

- Durch das Video habe ich meine Meinung verändert, da man im Video gesehen hat, wie sich durch das Hinzufügen des Farbstoffes die Anordnung der Teilchen wieder verändert hat.
- Ich habe es nicht ganz verstanden
- Der Farbstoff hat sich mit dem Wasser nach und nach vermischt, jedoch bin ich mir trotzdem unsicher.
- Da es nicht ganz genau beantwortet worden ist
- Das Video hat die Frage nicht erklärt weshalb ich diese Frage nicht beantworten kann

Kategorie 3

- Kenne die Fachbegriffe immernoch nicht

Begründungen für eine hohe Sicherheit mit der Modellaussagenauswahl nach *Elektrolyse mit Knallgasreaktion*

Kategorie 1

- Das Video hat die These sehr stark bewiesen
- ich denke dass das im Video gezeigt wurde
- Man hat es im video gesehen. Wasserstoff und Sauerstoff= neuer stoff
- Man konnte sehen wie sich die getrennten Stoffe wieder verbunden haben und danach zum ihrem Anfangszustand zurückkehren.
- Dank dem video
- Ich denke ich habe es richtig, weiß aber nicht ob ich den Versuch richtig verstanden habe.
- ich habe es im video so gelesen
- video
- Theorie und Video
- Der Versuch hat gezeigt, dass die Struktur der Materie sich ändern kann, wie man mit dem Wasser gesehen hat.
- In dem Video wurde erwähnt, dass die Eigenschaften der Teilchen gleich bleiben und sich doch nicht von anderen chemischen/physikalischen Einflüssen verändern lassen.
- das video hat mir auf die sprünge geholfen, insofern ich es richtig gedeutet habe
- Da im Video stand das sie eine Struktur haben
- Weil das Video mir geholfen hat zu verstehen.
- Ich habe dazu ein Video angeschaut welches gezeigt hat was richtig ist
- Das Video hat den Vorgang gut erklärt
- Man hat gesehen dass man die Stoffe aufteilen kann
- Da man am Reagenzglas denvschichtaufbeu nochmals genauer erkennen konnte
- Wegen dem Versuch im video
- Da es im Experiment so war
- Ich habe das Video gesehen.

- Da ich es durch das Video erfahren habe
- Weil ich es durch die Beobachtung des Versuchs so vermute.
- Ich habe mir das Video angesehen
- Das Video hat meine Vermutung unterstützt.
- Da man im Versuch gesehen hat, dass aus Wasser also Materie zwei andere Teilchen entstanden sind
- Im Video hat man gesehen wie Wasser in verschiedene Stoffe geteilt wird

Kategorie 2

- IMMER NOCH UNTERRICHT...
- The structure of an atom doesn't affect the appearance or shape of an element or compound but can affect its chemical properties such as how violent its reaction with other substances is.
- Gleiche Begründung wie vorher
- Unterricht

Kategorie 3

- Ich glaube das es richtig ist xD
- Ich konnte leider nicht gucken
- Keine Ahnung
- Keine Begründung vorzufinden.

Begründungen für eine niedrige Sicherheit mit der Modellaussagenauswahl nach *Elektrolyse mit Knallgasreaktion*

Kategorie 1

- Da ich den Versuch nicht ganz so verstanden habe.
- Das Video hat nicht viel erklärt.
- Video erweitert nicht mein Wissen über die Materie.
- Das Video hat mich verunsichert.
- Das Video hat mir nicht wirklich geholfen.
- Der Zusammenhang ist nicht vorhanden. Ich bin nach diesem Video genauso schlau wie davor.
- Im Video ist der letzte Teil der Aussage nicht wirklich erklärt worden.

Kategorie 2

- Die Struktur der Teilchen bleibt gleich, obwohl sich das Aussehen des Stoffes verändert (Gasförmig, Flüssig, etc.). Die Teilchen können sich, nachdem sie voneinander getrennt wurden, in ihre Struktur zurück verbinden.

Kategorie 3

- Immernoch keine Ahnung was Materie ist.
- Wieso wird das Wort "Materie" nicht erklärt?!

Anhang

- ich habe das nicht so verstanden
- Ka
- Gleiche Antwort
- Ich verstehe es immer noch nicht ganz :((
- Ich weiß nicht was ich sagen soll sryyyyy

Begründungen für eine hohe Sicherheit mit der Modellaussagenauswahl nach *Ei in Salzwasser*

Kategorie 1

- ich bin sicher da ich das video gesehen hat, dass mir erklärt wie es ist. Ich hab die selbe meinung wie vorher da das video meine vermutung bestätigt hat, dieser vermutung hatte ich da ich schon mal damit beschäftigt habe
- Man konnte es sehen, das die Teilchen ja sichtbar waren und sich erst später aufgelöst haben
- da das salz sich aufgelöst hat
- wegen den beobachtungen
- Man hat es im video gesehen
- Ich denke, dass zwischen den Teilchen nichts ist und deswegen es möglich ist, dass sich das Salz in Wasser so platzsparend anordnet.
- im versuch haben wir gesehen das im wasser eine bestimmte substanz ein ei zum beispiel tragen kann
- in dem Video wurde erwähnt, dass das Salz sich in die Lücken der Wasserteilchen gemischt hat. So lässt sich schließen, dass die Lücken vorher frei waren
- Theorie und Video
- Das Video hat mir geholfen bei meiner Entscheidung.
- Weil sich die Dichte geändert hat.
- Das Video hat mir wieder so einiges beigebracht. Ich bin Happy. Blub
- Weil ich glaube , dass im Video gesehen zu haben . 我也不會讓位
- Den in der Auswertung stand das da keine Substanz als nix zwischen den Teilchen ist
- Aufgrund des Videos, welches es aufgrund eines Versuches begründet hat.
- Weil es so im Video erklärt wurde
- Ich habe das Video angeguckt und alle Informationen entnommen
- Das Ei hat nicht gesunken wenn Salz war in das Wasser, das meint Salz hat die kleine gaps gefoult und die Dichte das Wasser war mehr als das Eis, aber wenn darvwar kein Salz in das Wasser hat dass Ei gesunken
- Ich hab das Video gesehen! :) super
- Weil es im Versuch so erklärt wird
- Das wurde im viedo erklärt und ich habe dies sehr gut verstanden

- Es wurde im Video gesagt, dass sich nichts zwischen den Teilchen befindet, also keine Freiräume.
- Im Video hat man gesehen, dass sich das Salz in dem Wasser aufgelöst hat. Man hat die Teilchen nicht mehr gesehen sie sind jedoch immernoch im Waasser, da sich die Dichte und das Volumen verändert hat. Mit freundlichen Grüßen, LUMA27
- Wegen dem Versuch
- Video
- weil es am meisten Sinn macht und weil es beim Experiment erwiesen worden ist aber ich habe keine Erklärung also Bye
- Zwischen den Teilchen befindet sich nichts. Salz füllte im Video diese Lücken und machte das Wasser Dichter, aber das Volumen nicht viel größer.
- Wegen dem Versuch und der Erklärung im Video sowie meines Vorwissens
- Da es im Versuch so erklärt wurde
- Da sich mein Vorwissen bewahrheitet hat
- Das Video hat mir die Bestätigung gegeben
- Beobachtung
- Weil es bei der Aufklärung des Videos aufgelöst wurde.
- Das Video hat die Frage geklärt
- Weil ich finde diese Aussage erklärt(?) dieses Experiment am nächsten.
- Weil es in dem Video gesagt wird und aus dem Unterricht
- so hab ich es in dem Video verstanden
- Wegen dem Video
- Aufgrund des Videos
- Es wurde gut am Ende erklärt, sodass ich das Experiment besser verstehen konnte

Kategorie 2

- Chemie-Unterricht, immer noch!
- ich bin mir immer noch ziemlich sicher, weil zwischen den Teilchen nichts ist. Zwar kann das Vakuum durch Teilchen eines anderen Stoffes kleiner werden, aber das Volumen wird nicht größer dadurch. Die Teilchen in einem Stoff kann man nicht sehen, da sie so klein sind.
- Ich bin mir nicht 100 Prozent sicher, weil ich nicht mehr weiß ob es ein zusammenhängender Stoff ist und ob man die Materie sehen kann
- Wenn man Salz mit Wasser mischt verbinden sich die Teilchen und nehmen mehr von dem Zwischenraum ein, also kann dort ja nicht Nichts sein.

Kategorie 3

- weil es halt so ist
- ich bleibe bei meiner Meinung
- aus meinem Gehirn
- habe verstanden

Anhang

- Ich kenne mich in dem Bereich etwas besser aus deshalb denke ich das diese Antwort richtig ist,würde mich aber gerne noch weiter informieren lassen Liebe Grüße
- weil das haltz so ist

Begründungen für eine niedrige Sicherheit mit der Modellaussagensauswahl nach *Ei in Salzwasser*

Kategorie 1

- Video hat fast nichts mit der Frage zutun
- Weil ich den Zusammenhang von der Frage und dem Video nicht verstehe.
- Ich bin mir nicht sicher, weil ich nicht viel zum Thema Materie weiß. Ich habe mir das Experiment angeschaut, aber es hatte eher mit dem Thema Dichte zutun. Von diesem Experiment konnte ich nicht wirklich ableiten, welche Aussage die richtige ist. Vielleicht habe ich was übersehen.
- Was hatte das Video damit zu tunen?
- Weil ich nicht viel von dem video verstanden habe (Da stand nichts über diese frage)

Kategorie 3

- ich hab gelesn ohne zu lesen. Habe einfach geraten:)
- Ich weiß immer noch nicht, was Materie überhaupt ist und weiß deshalb gar nichts über das Thema. Ich habe geraten:)
- Ich bin mir gar nicht sicher...Weil ich das nicht verstanden habe, habe ich es geraten.
- Was hat das Ganze mit Materien zutum????????!!!!!!
- Hab nicht alles verstanden
- ich bin mir nicht sicher,da ich die fragen nicht komplett verstanden habe.
- Ich kann das Video nicht schauen

Begründungen für eine hohe Sicherheit mit der Modellaussagensauswahl nach *Bilden und Lösen von Salzkristallen*

Kategorie 1

- da ich im Video dazugelernt habe
- Ich denke, dass das das ist was in dem Video stand
- Da, auch wenn man Salz in geschmacklosem Wasser auflöst, man trotzdem den Geschmack spüren kann und die Salzkristalle wieder zurück gewinnen kann.
- Da ich das Video angesehen habe und die es so erklärt haben.
- Dank dem Video.
- Wir haben gesehen das salz sich auflöst aber nach einiger zeit sozusagen wieder zu salzkörnern wird. also haben die teilchen doch einiges mit der materie zu tun
- Video

- weil es unmöglich ist, dass materie aus keinen teilchen besteht. die teilchen haben bestimmte eigenschaften, die erhalten bleiben, auch wenn der stoff selbst sich verändert. die teilchen aus denen salz aufgebaut ist scheinen dafür verantwortlich zu sein, welche eigenschaften die stoffe haben (z. b. geschmack oder aussehen).
- Durch das Video wurde meine Vermutung bestätigt
- video
- das trifft auf mein Verständniss des videos zu
- Wegen dem Video bin ich mir sicher
- Nach dem ich das Video geschaut habe, bin ich mir sicher geworden.
- Video+ Vorwissen
- Wegen dem Video bin ich mir ziemlich sicher, dass meine Überlegungen der Wahrheit entsprechen.
- Das Video hat mir dieses Thema sehr gut beigebracht. blub.
- Weil ich es in dem Video sah
- Das Video hat es mir deutlich erklärt
- Weil ich es für logisch halte und auch glaube die Bestätigung meiner Aussag im Video gesehen zu haben . Siu
- Da das Video meine Aussage bestätigt hat.
- Ich bin ziemlich sicher da ich ein erklärungsvideo gesehen habe und es meine Frage gut beantwortet
- Da ich aus dem Video erschlossen habe das die Teilchen auch Einfluss auf Geschmack usw habEn
- Ich habe das Video gesehen und Informationen in meinem immensen Gehirn gespeichert
- Es war im Video zu erkennen was ich eben erst geschaut hab
- weil ich diesmal das Video aufmerksamer angeguckt habe
- Weil es im Erklärvideo so in der Auswertung stand
- Da ich mir die Information aus dem Video gemerkt habe und mir diese Antwort am ehesten zugesagt hat
- Gleich Begründung wie vorher, der Versuch hat verdeutlicht, dass es Teilchen in Materie gibt, die man vielleicht nicht sehen können, aber die trotzdem den Geschmack, den Geruch oder das Aussehen beeinflussen.
- In dem Video wird gezeigt, wie sich das Salz im video gelöst und damit die Eigenschaften des Wassers verändert. Mit freundlichen Grüßen, LUMA27
- IAM LAZY BUT es macht sinn den beim salz versuch sahen die körner viereckig aus i am just guessing
- Da ich das Viedeo gesehen habe, es aber auch sein könnte das ich etwas falsch verstanden habe.
- Wegen dem Video

Anhang

- Das Video hat meine Vermutung bestätigt
- Weil es mir durch den Versuch klar wurde
- Ich habe mir das Video angeschaut, bin zwar noch nicht komplett sicher aber zuversichtlich, dass es richtig ist
- weil ich mir das video angekuckt habe
- Wwegem video
- wegen video
- wie im erklärvideo gezeigt, sieht man wie das salz wieder in die ursprüngliche form gerät.
- Auf Grund des Videos.
- Die Strukturen der Teilchen waren klar zu erkennen
- Nachdem das Salz im Versuch in Wasser aufgelöst wurde und das Wasser verdunstet ist haben sich wieder Salzkristalle gebildet, die sehr ähnlich zu den ursprünglichen aussahen

Kategorie 2

- Unterricht, immer noch!!!
- Wenn die Struktur sich ändert, ändert sich Geschmack, Geruch etc.
- You can't change the attributes of a substance only add things to them
- Die Teilchen bestimmt die Eigenschaft des Stoffes
- Unterricht

Kategorie 3

- Ich glaube das ist so
- Weil ich der Meinung bin,dass
- weil ich mir sicher bin
- weil ich es weiß
- Weis net
- Ich kenne mich mit diesem Thema etwas besser aus deshalb habe ich mich für diese Antwort entschieden, bin mir aber auch da nicht 100% sicher
- am logischsten
- Man konnte es sich gut herleiten
- Es klingt logisch aber ich kann mir nicht 100% sicher sein deswegen nur "ziemlich"
- Weil die anderen antworten falsch sind
- Kp
- KP
- Weil ich die Antwort jetzt weiß

Begründungen für eine niedrige Sicherheit mit der Modellaussagenauswahl nach *Bilden und Lösen von Salzkristallen*

Kategorie 1

- Es ist schön, dass ich jetzt was über Salz weiß und so, aber.....was ist Materie?!
- Weil mir das Video nicht so geholfen hat.
- Ich glaube jetzt, dass die Anordnung der Teilchen etwas damit zu tun hat, weil Struktur gleichgeblieben ist.
- ich hab das video zwar gesehen und auch verstanden, aber die Fragen waren komisch gestellt
- Ich verstehe nicht ganz was das mit dem Video zu tun hat.

Kategorie 2

- wir haben noch nicht über materien gelernt .

Kategorie 3

- Weil ich mir nicht sicher bin...?
- die Fragen sind kompliziert gestellt genauso wie die antworten
- Weil die Fragen komisch sind
- Ich bin mir nicht ganz sicher, da ich mich von zwei entschieden habe.
- ich bin mir nicht sicher, ob ich die frgestellungen richtig verstanden habe
- Weiß nicht
- Da die Antwort etwas kompliziert ist

Begründungen für eine hohe Sicherheit mit der Modellaussagenauswahl nach *Feldemissionsmikroskop*

Kategorie 1

- Das Experiment mit dem Mikroskop hat gezeigt wie die Materie Strukturen bildet
- Ich bin mir ziemlich sicher dass das im Video war
- Durch das Video bin ich mir weitrhin ziemlich sicher.
- Durch das Video erscheint für mich nur diese Antwort als wahr und gut.
- Ich bin mir relativ sicher, weil man in dem Video deutlich gesehen hat, dass Materie aus Teilchen besteht.
- Ich konnte meine Kenntnisse durch dieses Video bestätigen.
- Man hat die Teilchen gesehen.
- Das Video hat es veranschaulicht
- Weil ich glaube ,dass es stimmt weil ich glaube das ich das aus den Experimenten entnehmen kann , aber 100% bin ich mir nicht
- Da man die Strukturen der Teilchen im Video sehen konnte

Anhang

- Denn die Beobachtung und die Auswertung des Versuchs lassen stark darauf schließen dass es so ist
- Ich fand das Video etwas schwierig erklärt und die ganzen Texte habe ich auch nur ein wenig verstanden
- Im Video war zu sehen, wie sich die Teilchen der Materie verändert haben Mit Freundlichen Grüßen, LUMA27
- Weil ich das aus dem Video schlussfolgere.
- die einzelnen Bariumteilchen konnten mit einem speziellen Mikroskop "dargestellt" und so nachgewiesen werden.
- Wegen dem Versuch im Video und dem Text im video
- Das ist was das experiment aussagt
- Durch das Video ist mir klar geworden dasd die zweite aussage richtig ist
- Weil ich etwas sicherer wegen der Auswertung bin
- weil ich das aus dem video mitbekommen habe
- Da wir nur Bilder von Formen gesehen haben die uns schließen lässt dass das Teilchen sind
- In dem Versuch hat man gesehen wie verschiedene Stoffe verschiedene Formen auf dem Mikroskop hinterlassen haben
- Weil ich das Video geguckt habe großer

Kategorie 2

- Die Teilchen einer Materie sind strukturiert aufgebaut.
- Unterricht
- Gleiche Begründung wie die vorherige Antwort

Kategorie 3

- ich konnte mich zwischen zwei Möglichkeiten nicht entscheiden, deshalb bin ich mir nicht 100 pro sicher.
- Ich bin bei meiner Entscheidung geblieben.
- Weil ich denke das es richtig ist
- Goldene Mitte
- Isso
- sehr gut

Begründungen für eine niedrige Sicherheit mit der Modellaussagenauswahl nach *Feldemissionsmikroskop*

Kategorie 1

- weil ich das video nicht verstanden habe (unbekannte Fachbegriffe)
- Mt dem Mikroskop sieht man den genauen Ablauf der Stoffe.
- Ich bin mir nicht sicher,weil ich so ein Experiment noch nie gemacht habe...
- Hab den Versuch nicht verstanden.

- habe die im video genannten begriffe nicht verstanden da
- Nach dem Video bin ich mir weniger sicher. Für mich passt die Frage öfters mal weniger zum Video
- Ich habe es aus dem Video nicht ganz schließen können, was die Antwort ist
- Ich habe den Versuch nicht ganz verstanden
- Ich habe dieses Video nicht ganz verstanden
- Mit spitzziellen Mikroskopen waren sie zuerkennen daher stimme ich für diese Aussage.
- Ich habe das Video nicht ganz verstanden
- ich habe das experiment nicht so gut verstanden

Kategorie 3

- ich glaube es dass es so ist weil ich es so denke
- weil ich das fertig habern will
- ich glaube das es so ist, weil es vielleicht so ist
- idk
- hä? Ich habe überhaupt nicht gerafft, was gerade passiert ist, wieso kann mir niemand erklären, was Materie ist oder wenigstens irgendeinen Hinweis geben, was das sein könnte?!
- hab es nicht richtig verstanden
- Hab wenig verstanden
- Die Fachbegriffe verwirren mich
- Ich habe es nicht komplett erkannt.
- Da es nicht direkt angedeutet wurde
- Ich habe es nicht so richtig verstanden
- Keine Ahnung!
- Weil ich damit am meisten zu stimme.
- Weil ich mir nicht sichger bin
- Keine Ahnung

Begründungen für eine hohe Sicherheit mit der Modellaussagenauswahl nach Ölfleckversuch

Kategorie 1

- Da man sehen konnte, dass die Öl-Tropfen sich gleichmäßig verbreiten und proportional sind.
- DA es so im Video erklärt worden ist.
- video???
- es wurd im video so beschrieben.
- wegen dem Video was ich gerade gesehen habe
- Ich bin durch das supertolle Video besser darüber informiert. blub.

Anhang

- Das Video hat es mir deutlich veranschaut
- Die Größe des Öls ist proportional zur Zunahme des Wassers. Also hängen sie zusammen.
- Weil ich es aus dem Video entnehme
- da im video die teilchen aneinander hängen und sich auch wegbewegenlassen.
- Das Lernvideo hat gezeigt das diese Antwort richtig sein könnte
- Ich habe das Video gesehen
- Das Video
- Weil der versuch und die dazu passenden aussagen es bewiesen haben
- Da ich dies aus dem Video gelernt habe
- Durch das Video ist mir das jetzt klar geworden
- Da ich es durch das Video erläutert bekommen habe
- Weil ich es durch den Versuch erkennen konnte
- Ich habe mir das Video angesehen
- Weil ich mir das Video angeguckt habe
- Beobachtungen im Video.

Kategorie 2

- Man kann nichts über die Eigenschaften der Stoffe aussagen da sie immer verschieden sind.
- Gleiche Begründung wie vorherige Antwort.
- Alle Stoffe bestehen aus Teilchen. Teilchen eines Stoffes haben die selben Eigenschaften (wie Größe)

Kategorie 3

- Alles andere macht für mich keinen Sinn
- Weil ich glaube, dass es so ist.
- ich habe zwar keine Ahnung, was das Alles mit Materie zutun hat, aber das war jetzt reine Intuition!
- Ich vermute das ich es weiß aber bin mir ziemlich bis kaum sicher
- Ja denke ich halt
- Weil es mir logisch erschien
- mehr dazu gelernt

Begründungen für eine niedrige Sicherheit mit der Modellaussagenauswahl nach Ölfleckversuch

Kategorie 1

- aus dem Video habe ich mehr gelernt
- Weil ich nicht weiß, wie das Erklärvideo irgendetwas damit zu tun hat.
- NACH dem Versuch bin ich mir nicht mehr ganz sicher

- Ich bin mir immer noch nicht sicher, da ich den Zusammenhang zwischen dem Video und dieser Frage nicht verstanden habe.
- video hilft nicht wirklich weiter
- Das Video hat meine Aussage nicht beantwortet.
- Weil das Video nicht weiterhilft
- Ich fand die Erklärung nicht genau genug
- ich verstehe nicht was die Frage mit dem video zu tun hat aber das Video an sich habe ich verstanden
- Der Versuch hat mir nicht geholfen

Kategorie 2

- Weil Materie aus Teilchen besteht und es proportional ist, also je mehr desto mehr und so müssen dann wahrscheinlich die Teilchen die gleiche Größe haben
- Materie ist alles außer ein schwarzes Loch das ist Antimaterie

Kategorie 3

- Ich habe die Texte nicht verstanden und erneut geraten
- Weil ich es immernoch nicht weiß.
- ich habe das nicht so ganz verstanden und deswegen bin ich mir unsicher
- ich habe es nicht verstanden
- Ich finde die Antwort am sinnvollsten.
- Wenig verstanden
- ich habe das Thema nicht so gut verstanden
- Da ich jetzt nicht genau weiß was das für einen Zusammenhang hat
- Weil ich es nicht ganz verstanden habe.
- weil ich nicht in der Uni studiere
- So. Vorherige Antwort

Begründungen für eine hohe Sicherheit mit der Modellaussagenauswahl nach *Gesetz der konstanten Proportionen*

Kategorie 1

- Dank des Versuches.
- Video + Unterricht
- Dank der schönen Erklärung
- Das Video hat mir geholfen.
- Man hat gesehen, dass es doppelt so viel Wasserstoff im Wasser gibt, wie Sauerstoff, wodurch man sich den chemischen Namen von Wasser erschließen kann: H_2O
- Da ich vermute, dass ich mir jene Information aus dem Video merken konnte bin ich mir ziemlich sicher
- Das Video hat es veranschaulicht
- das Video hat meine Vermutung/Erfahrung bestätigt

Anhang

- Die Teilchen hatten im Video ein Verhältnis zueinander, also gehe ich davon aus, dass es immer so ist.
- Hab mir das Video angeguckt und da war ein Beispiel mit Wasserstoff und Sauerstoff, welches ein Verhältnis hatte
- Da das Video es mit einem Versuch der Spaltung von Wasser in Sauerstoff und Wasserstoff gezeigt hat.
- Ich habe mir das Video noch einmal angeschaut und für mich hat sich meine Vermutung bestätigt
- Da ich vermute, dass ich mir jene Information aus dem Video merken konnte und die Gasbildung in einem bestimmten Verhältnis, welches auch durch den Namen H_2O wiedergegeben wird. Mit freundlichen Grüßen, LUMA27
- Weil ich gesehen habe, dass selbst Wasser aus mehreren kleinen Teilchen besteht und das immer aus verschiedenen Verhältnissen geschieht, was vom Stoff abhängig ist
- Weil das Video es mithilfe des Versuches bewiesen hat
- Durch das Video mit der Elektrolyse ist mir klar geworden, wie die einzelnen Teile von Wasser (Sauerstoff und Wasserstoff) in Gas umwandeln und aus den kleinsten Teilchen bestehen. Auch dass man die Verhältnisse (1:2) so bestimmen kann, ist mir klar geworden.
- Wegen dem Video
- Weil es mir durch den Versuch klar geworden ist.
- Weil man auch im Video sehen kann, dass die verschiedenen Teilchen anders reagieren.
- weil es im Video so bewiesen wurde
- im Video hat man gesehen, dass sie immer in einem bestimmten Verhältnis zueinander chemische Verbindungen eingehen und da ich schon weiß, dass Wasser aus kleinen schwer sichtbaren Teilchen besteht, habe ich diese Antwort gewählt.
- wegen Video
- Das Video hat es mir gezeigt
- Auf Grund des Videos.

Kategorie 2

- Reine Stoffe gehen immer in ein bestimmtes Verhältnis ein. Bei Wasser ist es 2 Wasserstoff zu 1 Sauerstoff
- Die chemische Formel von Wasser deutet darauf hin, in welchem ganz bestimmten Verhältnis Sauerstoff und Wasserstoff sind.
- Da ich das im Unterricht hatte.
- Gleiche Begründung wie vorher, z.B. Wasser entsteht in einem 2:1 Verhältnis mit Sauerstoff
- Unterricht an der Schule hat ja auch irgendeinen Zweck haben muss

- Wenn Reinstoffe zusammen gemischt werden um einen Stoff zu erstellen geschieht dies immer in bestimmten Verhältnissen

Kategorie 3

- ich denke dass es richtig ist
- ich weiß nicht.mir ist langweilig
- KP

Begründungen für eine niedrige Sicherheit mit der Modellaussagenauswahl nach *Gesetz der konstanten Proportionen*

Kategorie 1

- ich habe es mehr verstanden
- Das Video hat mir nicht richtig geholfen.
- Das Video hat meiner Meinung nach nicht viel gebracht. Es hat mich verunsichert.
- Video nicht verständlich
- Ich fand das Video sehr komplex und konnte nicht so viel da herauslesen
- Das Experiment war zu einfach um sich zu konzentrieren

Kategorie 3

- ich habe es einfach nicht verstanden
- nicht verstanden
- weil ich nichts verstanden habe
- ICH WEISS ES NICHT!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
- kp
- Ich war mir nicht so sicher
- hab nicht so viel verstanden
- Ich bin echt müde und konnte leider nicht sehr aufmerksam zuschauen
- Habs net gecheckt und nicht so gut aufgepasst
- Ich kann es nicht begründen
- Weil ich mich nicht so gut erinnere
- ich habe eine kürzere aufmerksamkeit als eine fliege
- Weil ich mir nicht sicher bin
- Ich hab's gar nicht verstanden

Beispielitems des Konzepttests zum Aufbau der Materie

Die Antwortoptionen sind nach der Niveaustufe, der sie entsprechen, in steigender Reihenfolge aufgeführt (s. Erläuterungen zum Testinstrument auf S. 70).

- Daniel sammelt Münzen. Seine Sammlung umfasst viele glänzende Münzen. Wie sind Münzen eigentlich aufgebaut?
 1. Münzen bestehen aus einem Stück. Sie sind nicht aus kleineren Teilchen aufgebaut.
 2. Münzen sind aus kleinen Kugeln aufgebaut, die von einem glänzenden Metall umgeben sind.
 3. Münzen bestehen aus farblosen Teilchen, die von einer glänzenden Masse umgeben sind.
 4. Münzen sind aus kleinen, glänzenden Teilchen aufgebaut.
 5. Münzen sind aus Teilchen aufgebaut, die nicht glänzen.

- Julide möchte schlafen, aber der tropfende Wasserhahn im Badezimmer nebenan hält sie wach. Während sie wach liegt, stellt sie sich vor, wie Wasser aufgebaut sein könnte. Wie sehen die Teilchen aus, aus denen Wasser aufgebaut ist?
 1. Wasserteilchen sehen aus wie Wassertropfen.
 2. Wasserteilchen sehen aus wie Wassertropfen, sind aber keine.
 3. Wasserteilchen sind kleine Kugeln, die im Wasser schwimmen.
 4. Wasserteilchen sehen aus wie Wassertropfen, sie sind von Luft umgeben.
 5. Wasserteilchen sehen nicht aus wie Wassertropfen und sind auch nicht flüssig.

- Danielas Mutter kocht sich morgens immer frischen Kaffee. Dazu gibt sie braunes Kaffeepulver in den Filter und gießt klares, heißes Wasser darüber. Der Kaffee ist hinterher braun. Wieso wird Kaffee eigentlich braun, obwohl das Wasser doch klar war?
 1. Immer wenn Wasser auf eine braune Substanz trifft, färbt es sich braun.
 2. Der Filter hält alle Kaffeeteilchen zurück. Die Farbe kommt vom Filter.

3. Die Masse um die Kaffeeteilchen, der eigentliche Kaffee, gelangt durch den Trichter und färbt das Wasser braun.
 4. Die Farbe entsteht durch farbige Teilchen im Kaffee, die durch den Filter gekommen sind.
 5. Die Farbe entsteht durch Kaffeeteilchen, die durch den Filter gekommen sind.
- Mehmet stellt an einem heißen Sommertag eine Glasschale mit Wasser in den Garten, damit Vögel daraus trinken können. Nach drei Stunden ist kein Wasser mehr in der Schale, obwohl Mehmet die Schale genau beobachtet und keinen Vogel gesehen hat. Als Mehmet einen Blick in die Schale wirft, kann er kein Wasser mehr sehen. Wie sind Mehmet's Beobachtungen zu erklären?
 1. Wasser ist durch das Glas in den Erdboden versunken.
 2. Das Glas hat das Wasser aufgenommen.
 3. Der Rückstand sind die Wasserteilchen. Das eigentliche Wasser ist verdampft.
 4. Der Rückstand ist das Medium, das die Wasserteilchen zusammenhält.
 5. Die Wasserteilchen sind in der Luft.
 - Gibt man einen frischen Apfel auf den Kompost, so ist er nach einigen Wochen nicht mehr wiederzuerkennen. Er hat viele braune Stellen und ist in sich zusammengefallen. Was ist mit dem Apfel passiert?
 1. Die Apfelteilchen verschwinden nach und nach.
 2. Die braunen Stellen sind braune Teilchen, die schon vorher im Apfel waren und jetzt gewachsen sind.
 3. Die Oberfläche des Apfels hat die Farbe geändert, der Apfel ist von den Inhaltsstoffen gleichgeblieben.
 4. Einige Apfelteilchen wurden in Energie verwandelt.
 5. Apfelteilchen haben sich mit anderen Teilchen verbunden.

QR-Code und URL zu den in der Studie verwendeten interaktiven Experimentivideos:



<https://physikexperimentieren.uni-frankfurt.de/videos-erhebung/>

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich besonders meinem Doktorvater Roger Erb für die intensive Unterstützung und Betreuung danken, die stets von einer konstruktiven und angenehmen Atmosphäre geprägt waren und dieses Promotionsprojekt ermöglicht haben.

Auch die Zusammenarbeit mit all meinen Kolleg*innen am Institut für Didaktik der Physik war eine Freude und ist es immer noch. Besonders möchte ich dafür Laura Pannullo, Mareike Freese, Albert Teichrew und Sean Weatherby danken.

Außerdem bin ich sehr dankbar für all die Freund*innen und Familienmitglieder, die sowohl aus der Ferne als auch von ganz nah für mich da waren und ohne deren Unterstützung ich nicht weit gekommen wäre.

Bisher erschienene Bände der Reihe
Studien zum Physik- und Chemielernen

ISSN 1614-8967

Vollständige Übersicht auf unserer Website



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

Aktuelle Bände

- 310 Wolfgang Becker (2021): Auswirkungen unterschiedlicher experimenteller Repräsentationen auf den Kenntnisstand bei Grundschulkindern
ISBN 978-3-8325-5255-8 50.00 EUR
- 311 Marvin Rost (2021): 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 (open access)
- 312 Christina Kobl (2021): Förderung und Erfassung der Reflexionskompetenz im Fach Chemie
ISBN 978-3-8325-5259-6 41.00 EUR (open access)
- 313 Ann-Kathrin Beretz (2021): Diagnostische Prozesse von Studierenden des Lehramts. eine Videostudie in den Fächern Physik und Mathematik
ISBN 978-3-8325-5288-6 45.00 EUR (open access)
- 314 Judith Breuer (2021): 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 (open access)
- 315 Michaela Oettle (2021): Modellierung des Fachwissens von Lehrkräften in der Teilchenphysik. Eine Delphi-Studie
ISBN 978-3-8325-5305-0 57.50 EUR (open access)
- 316 Volker Brüggemann (2021): Entwicklung und Pilotierung eines adaptiven Multistage-Tests zur Kompetenzerfassung im Bereich naturwissenschaftlichen Denkens
ISBN 978-3-8325-5331-9 40.00 EUR (open access)
- 317 Stefan Müller (2021): 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 (2021): Alltagsentscheidungen für den Chemieunterricht erkennen und Entscheidungsprozesse explorativ begleiten
ISBN 978-3-8325-5379-1 59.00 EUR
- 319 Lars Ehlert (2021): Entwicklung und Evaluation einer Lehrkräftefortbildung zur Planung von selbstgesteuerten Experimenten
ISBN 978-3-8325-5393-7 41.50 EUR (open access)
- 320 Florian Seiler (2021): Entwicklung und Evaluation eines Seminarkonzepts zur Förderung der experimentellen Planungskompetenz von Lehramtsstudierenden im Fach Chemie
ISBN 978-3-8325-5397-5 47.50 EUR (open access)
- 321 Nadine Boele (2021): 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 (2022): Entwicklung und Evaluation digitalisierungsbezogener Kompetenzen von angehenden Chemielehrkräften
ISBN 978-3-8325-5410-1 49.50 EUR
- 323 Lars-Frederik Weiß (2021): 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 (2021): Kumulatives Lehren und Lernen im Lehramtsstudium Physik. Theorie und Evaluation eines Lehrkonzepts
ISBN 978-3-8325-5421-7 51.50 EUR
- 325 Kübra Nur Celik (2022): 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 (2022): 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 (2022): 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 (2022): Schülerlabore als interessefördernde authentische Lernorte für den naturwissenschaftlichen Unterricht nutzen
ISBN 978-3-8325-5454-5 50.50 EUR
- 329 Christopher Kurth (2022): Die Kompetenz von Studierenden, Schülerschwierigkeiten beim eigenständigen Experimentieren zu diagnostizieren
ISBN 978-3-8325-5457-6 58.50 EUR

- 330 Dagmar Michna (2022): 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 (2022): 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 (2022): 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 (open access)
- 333 Erik Heine (2022): Wissenschaftliche Kontroversen im Physikunterricht. Explorationsstudie zum Umgang von Physiklehrkräften und Physiklehramtsstudierenden mit einer wissenschaftlichen Kontroverse am Beispiel der Masse in der Speziellen Relativitätstheorie
ISBN 978-3-8325-5478-1 48.50 EUR (open access)
- 334 Simon Goertz (2022): 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 (2022): 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 (open access)
- 336 Alina Behrendt (2022): 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 (open access)
- 337 Manuel Daiber (2022): Entwicklung eines Lehrkonzepts für eine elementare Quantenmechanik. Formuliert mit In-Out Symbolen
ISBN 978-3-8325-5507-8 48.50 EUR
- 338 Felix Pawlak (2022): Das Gemeinsame Experimentieren (an-)leiten. Eine qualitative Studie zum chemiespezifischen Classroom-Management
ISBN 978-3-8325-5508-5 46.50 EUR
- 339 Liza Dopatka (2022): Konzeption und Evaluation eines kontextstrukturierten Unterrichtskonzeptes für den Anfangs-Elektrizitätslehreunterricht
ISBN 978-3-8325-5514-6 69.50 EUR
- 340 Arne Bewersdorff (2022): Untersuchung der Effektivität zweier Fortbildungsformate zum Experimentieren mit dem Fokus auf das Unterrichtshandeln
ISBN 978-3-8325-5522-1 39.00 EUR (open access)

- 341 Thomas Christoph Münster (2022): Wie diagnostizieren Studierende des Lehramtes physikbezogene Lernprozesse von Schüler*innen?. Eine Videostudie zur Mechanik
ISBN 978-3-8325-5534-4 44.50 EUR (open access)
- 342 Ines Komor (2022): Förderung des symbolisch-mathematischen Modellverständnisses in der Physikalischen Chemie
ISBN 978-3-8325-5546-7 46.50 EUR
- 343 Verena Petermann (2022): 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 (open access)
- 344 Jana Heinze (2022): Einfluss der sprachlichen Konzeption auf die Einschätzung der Qualität instruktionaler Unterrichtserklärungen im Fach Physik
ISBN 978-3-8325-5553-5 42.00 EUR (open access)
- 345 Jannis Weber (2022): Mathematische Modellbildung und Videoanalyse zum Lernen der Newtonschen Dynamik im Vergleich
ISBN 978-3-8325-5566-5 68.00 EUR (open access)
- 346 Fabian Sterzing (2022): 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 (open access)
- 347 Lars Greitemann (2022): 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 (2022): Diagnose experimenteller Kompetenzen in der laborpraktischen Chemielehrer*innenbildung
ISBN 978-3-8325-5587-0 48.00 EUR
- 349 William Lindlahr (2023): 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 (2023): Teilnahmemotivation und situationales Interesse von Kindern und Eltern im experimentellen Lernsetting KEMIE
ISBN 978-3-8325-5598-6 43.00 EUR
- 351 Katharina Nave (2023): 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 (2023): Experimentelle Kompetenz Physikstudierender. Entwicklung und erste Erprobung eines performanzorientierten Kompetenzstrukturmodells unter Nutzung qualitativer Methoden
ISBN 978-3-8325-5625-9 47.00 EUR (open access)

- 353 Jan Schröder (2023): Entwicklung eines Performanztests zur Messung der Fähigkeit zur Unterrichtsplanung bei Lehramtsstudierenden im Fach Physik
ISBN 978-3-8325-5655-6 46.50 EUR
- 354 Susanne Gerlach (2023): Aspekte einer Fachdidaktik Körperpflege. Ein Beitrag zur Standardentwicklung
ISBN 978-3-8325-5659-4 45.00 EUR
- 355 Livia Murer (2023): Diagnose experimenteller Kompetenzen beim praktisch-naturwissenschaftlichen Arbeiten. Vergleich verschiedener Methoden und kognitive Validierung eines Testverfahrens
ISBN 978-3-8325-5657-0 41.50 EUR (open access)
- 356 Andrea Maria Schmid (2023): Authentische Kontexte für MINT-Lernumgebungen. Eine zweiteilige Interventionsstudie in den Fachdidaktiken Physik und Technik
ISBN 978-3-8325-5605-1 57.00 EUR (open access)
- 357 Julia Ortmann (2023): Bedeutung und Förderung von Kompetenzen zum naturwissenschaftlichen Denken und Arbeiten in universitären Praktika
ISBN 978-3-8325-5670-9 37.00 EUR (open access)
- 358 Axel-Thilo Prokop (2023): Entwicklung eines Lehr-Lern-Labors zum Thema Radioaktivität. Eine didaktische Rekonstruktion
ISBN 978-3-8325-5671-6 49.50 EUR
- 359 Timo Hackemann (2023): Textverständlichkeit sprachlich variierten physikbezogener Sachtexte
ISBN 978-3-8325-5675-4 41.50 EUR (open access)
- 360 Dennis Dietz (2023): 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 (2023): Vielfalt im Physikunterricht. Zur Wirkung von Lehrkräftefortbildungen unter Diversitätsaspekten
ISBN 978-3-8325-5672-3 65.50 EUR (open access)
- 362 Simon Kaulhausen (2023): Strukturelle Ursachen für Klausurmisserfolg in Allgemeiner Chemie an der Universität
ISBN 978-3-8325-5699-0 37.50 EUR (open access)
- 363 Julia Eckoldt (2023): 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 (open access)

- 364 Albert Teichrow (2023): Physikalische Modellbildung mit dynamischen Modellen
ISBN 978-3-8325-5710-2 58.50 EUR (open access)
- 365 Sascha Neff (2023): Transfer digitaler Innovationen in die Schulpraxis. Eine explorative Untersuchung zur Förderung der Implementation
ISBN 978-3-8325-5687-7 59.00 EUR (open access)
- 366 Rahel Schmid (2023): Verständnis von Nature of Science-Aspekten und Umgang mit Fehlern von Schüler*innen der Sekundarstufe I. Am Beispiel von digital-basierten Lernprozessen im informellen Lernsetting Smartfeld
ISBN 978-3-8325-5722-5 53.50 EUR (open access)
- 367 Dennis Kirstein (2023): Individuelle Bedingungs- und Risikofaktoren für erfolgreiche Lernprozesse mit kooperativen Experimentieraufgaben im Chemieunterricht. Eine Untersuchung zum Zusammenhang von Lernvoraussetzungen, Lerntätigkeiten, Schwierigkeiten und Lernerfolg beim Experimentieren in Kleingruppen der Sekundarstufe I
ISBN 978-3-8325-5729-4 50.50 EUR (open access)
- 368 Frauke Düwel (2024): Argumentationslinien in Lehr-Lernkontexten. Potenziale englischer Fachtexte zur Chromatografie und deren hochschuldidaktische Einbindung
ISBN 978-3-8325-5731-7 63.00 EUR (open access)
- 369 Fabien Güth (2023): Interessenbasierte Differenzierung mithilfe systematisch variierten Kontextaufgaben im Fach Chemie
ISBN 978-3-8325-5737-9 48.00 EUR (open access)
- 370 Oliver Grewe (2023): Förderung der professionellen Unterrichtswahrnehmung und Selbstwirksamkeitsüberzeugungen hinsichtlich sprachsensibler Maßnahmen im naturwissenschaftlichen Sachunterricht. Konzeption und Evaluation einer video- und praxisbasierten Lehrveranstaltung im Masterstudium
ISBN 978-3-8325-5738-6 44.50 EUR (open access)
- 371 Anna Nowak (2023): Untersuchung der Qualität von Selbstreflexionstexten zum Physikunterricht. Entwicklung des Reflexionsmodells REIZ
ISBN 978-3-8325-5739-3 59.00 EUR (open access)
- 372 Dominique Angela Holland (2023): Bildung für nachhaltige Entwicklung (BNE) kooperativ gestalten. Vergleich monodisziplinärer und interdisziplinärer Kooperation von Lehramtsstudierenden bei der Planung, Durchführung und Reflexion von Online-BNE-Unterricht
ISBN 978-3-8325-5760-7 47.00 EUR (open access)
- 373 Renan Marcello Vairo Nunes (2024): MINT-Personal an Schulen. Eine Untersuchung der Arbeitssituation und professionellen Kompetenzen von MINT-Lehrkräften verschiedener Ausbildungswege
ISBN 978-3-8325-5778-2 51.00 EUR (open access)
- 374 Mats Kieserling (2024): Digitalisierung im Chemieunterricht. Entwicklung und Evaluation einer experimentellen digitalen Lernumgebung mit universeller Zugänglichkeit
ISBN 978-3-8325-5786-7 45.50 EUR

- 375 Cem Aydin Salim (2024): Die Untersuchung adaptiver Lernsettings im Themenbereich „Schwimmen und Sinken“ im naturwissenschaftlichen Unterricht
ISBN 978-3-8325-5787-4 49.00 EUR (open access)
- 376 Novid Ghassemi (2024): Evaluation eines Lehramtsmasterstudiengangs mit dem Profil Quereinstieg im Fach Physik. Erkenntnisse zu Eingangsbedingungen, professionellen Kompetenzen und Aspekten individueller Angebotsnutzung
ISBN 978-3-8325-5789-8 41.50 EUR (open access)
- 377 Martina Flurina Cavelti (2024): Entwicklung und Validierung eines Messinstruments zur Erfassung der Schülerkompetenzen im Bereich des wissenschaftlichen Skizzierens im Fach Chemie in der Sekundarstufe I
ISBN 978-3-8325-5829-1 45.00 EUR (open access)
- 378 Tom Bleckmann (2024): Formatives Assessment auf Basis von maschinellem Lernen. Eine Studie über automatisiertes Feedback zu Concept Maps aus dem Bereich Mechanik
ISBN 978-3-8325-5842-0 46.50 EUR (open access)
- 379 Jana Marlies Rehberg (2024): Das physikspezifische Mindset zum Studienbeginn. Fragebogenentwicklung und Aufbau einer Online-Intervention
ISBN 978-3-8325-5850-5 59.50 EUR (open access)
- 380 Florian Trauten (2024): Entwicklung und Evaluation von automatisierten Feedbackschleifen in Online-Aufgaben im Fach Chemie
ISBN 978-3-8325-5859-8 46.00 EUR (open access)
- 381 Johanna Dejanovikj (2024): Reflexion als Lerngegenstand im Unterricht zur Förderung von Bewertungskompetenz
ISBN 978-3-8325-5860-4 41.00 EUR (open access)
- 382 Katharina Flieser (2024): Verständlichkeit physikalischer Sachtexte. Untersuchungen zum Wirkungsgefüge zwischen sprachlicher Textgestaltung und der Behaltensleistung sowie der Textwahrnehmung im Schulfach Physik
ISBN 978-3-8325-5858-1 44.00 EUR (open access)
- 383 Stephanie Neppl (2024): Perspektivenübernahme im Physikunterricht. Explorative Interviewstudie zu einer Seminarkonzeption mit dem Schwerpunkt Perspektivenübernahme bei der Planung von Physikunterricht
ISBN 978-3-8325-5865-9 48.00 EUR (open access)
- 384 Katja Plicht (2024): Ein Physikübungskonzept zur Förderung der Problemlösekompetenz. Entwicklung und empirische Evaluation eines Strategietrainings auf der Basis von Expertisemerkmalen
ISBN 978-3-8325-5875-8 45.00 EUR (open access)
- 385 Svenja Boegel (2024): Feedback beim Experimentieren: Zur Rolle von Cognitive Load und Motivation
ISBN 978-3-8325-5911-3 45.50 EUR (open access)

- 386 Laura Pannullo (2025): Wahlmöglichkeiten beim Experimentieren: Entwicklung und Erprobung eines Konzeptes für Experimente in inklusiven Lerngruppen im Physikunterricht
ISBN 978-3-8325-5916-8 46.50 EUR (open access)
- 387 Matthias Schweinberger (2025): „Stumme Videos“. Aufmerksamkeitslenkende Moderation von Demonstrationsexperimenten
ISBN 978-3-8325-5930-4 50.50 EUR
- 388 Rike Große-Heilmann (2025): Entwicklung fachdidaktischen Wissens zum Einsatz digitaler Medien im Fach Physik
ISBN 978-3-8325-5943-4 51.00 EUR (open access)
- 389 Lion Cornelius Glatz (2025): Eine vergleichende Betrachtung der Überzeugungskraft von Experimenten zum Teilchenmodell
ISBN 978-3-8325-5954-0 42.00 EUR (open access)
- 390 Rasmus Viefers (2025): Förderung der Variablenkontrollstrategie im Sachunterricht
ISBN 978-3-8325-5968-7 44.50 EUR (open access)
- 391 Luc Albrecht (2025): Kritisches Denken in der Chemielehrer*innenbildung. Eine konzeptionell-empirische Studie zur Integration und Operationalisierung
ISBN 978-3-8325-5970-0 57.00 EUR
- 392 Anna Weißbach (2025): Reflexion von Physikunterricht. Entwicklung und Validierung eines Testinstruments mit Assessment-Feedback zur Reflexionsfähigkeit Physik-Lehramtsstudierender
ISBN 978-3-8325-5977-9 50.50 EUR

Vollständige Übersicht unter: <https://www.logos-verlag.de/spcl>

Alle erschienenen Bücher können unter der angegebenen ISBN direkt online (<http://www.logos-verlag.de>) oder telefonisch (030 - 42 85 10 90) 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

Dass Materie aus diskreten Teilchen besteht, ist eine bedeutende Erkenntnis naturwissenschaftlicher Forschung und in der Sekundarstufe I fester Bestandteil des Schulunterrichts. Submikroskopische Teilchen können aber nicht mit dem menschlichen Auge erfasst werden und unterscheiden sich in ihren Eigenschaften stark von makroskopischen Objekten, die wir aus dem Alltag kennen. Diese Umstände erschweren es Schüler:innen, wissenschaftlich angemessene Vorstellungen von Teilchen aufzubauen, selbst wenn diese im Unterricht explizit thematisiert werden.

Deshalb stellt sich die Frage, welche Experimente zum Teilchenmodell auf Schüler:innen überzeugend wirken. Um dies zu untersuchen, wurden $N = 153$ Schüler:innen der achten Jahrgangsstufe mithilfe von Fragebögen befragt. Darin wurde unter anderem die Übereinstimmung mit unterschiedlichen Aspekten des Teilchenmodells erhoben und erfasst, inwiefern Beobachtungen aus Experimenten dabei eine Rolle spielen. Die Experimente wurden in Form interaktiver Videos präsentiert und ermöglichten es den Schüler:innen, während des Betrachtens die Rolle der experimentierenden Person einzunehmen.

Die Ergebnisse zeigen, dass vor allem die Experimente als überzeugend wahrgenommen werden, die inhaltlich weniger schwierig sind und anschauliche Phänomene in den Mittelpunkt stellen. Außerdem lassen sich hier gewonnene Erkenntnisse auf andere Themenbereiche übertragen, da sie sich auf allgemeine Merkmale der Experimente, wie die Komplexität des Aufbaus, beziehen.

Logos Verlag Berlin

ISBN 978-3-8325-5954-0