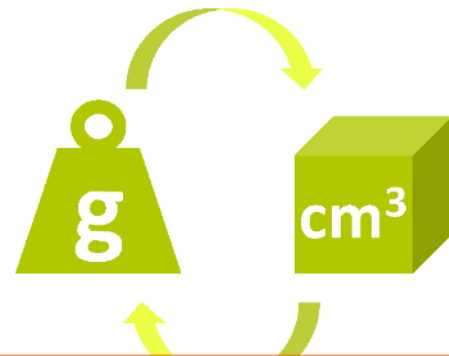
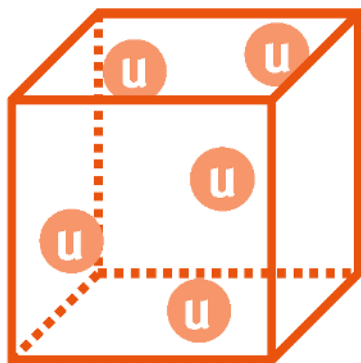
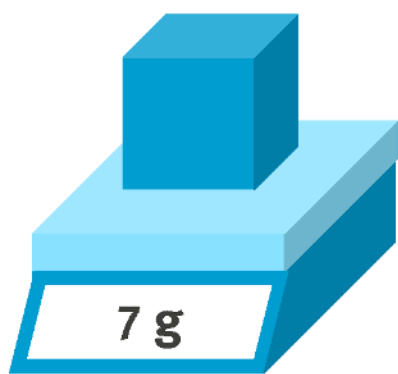




Band 18

A. Marohn (Hrsg.)

Lernen in Naturwissenschaften

verstehen und entwickeln

Pascal Dorweiler

Mathematische Grundvorstellungen im Chemieunterricht

Entwicklung und Untersuchung einer Unterrichtskonzeption
zur Förderung des Verstehens mathematisch-chemischer Begriffe

λoγoς

Lernen in
Naturwissenschaften

Band 18

Lernen in Naturwissenschaften

Band 18

Herausgegeben von
Prof. Dr. Annette Marohn
Universität Münster
Institut für Didaktik der Chemie

Pascal Dorweiler

Mathematische Grundvorstellungen
im Chemieunterricht

Entwicklung und Untersuchung einer
Unterrichtskonzeption zur Förderung des Verstehens
mathematisch-chemischer Begriffe

Logos Verlag Berlin



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-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/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.

Logos Verlag Berlin GmbH 2026

ISBN 978-3-8325-6077-5

ISSN 2566-493X

DOI 10.30819/6077

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

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

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

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

Didaktik der Chemie

Mathematische Grundvorstellungen im Chemieunterricht

Entwicklung und Untersuchung einer
Unterrichtskonzeption zur Förderung des Verstehens
mathematisch-chemischer Begriffe

Inaugural-Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades in der
Philosophie im Fachbereich Chemie und Pharmazie der
Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität
Münster

vorgelegt von

Pascal Dorweiler (geb. Meyer)

aus Olpe

2025

Dekanin:	Prof. Dr. Dagmar Klostermeier
Erste Gutachterin:	Prof. Dr. Annette Marohn
Zweiter Gutachter:	Prof. Dr. Gilbert Greefrath
Tag der mündlichen Prüfung:	28.10.2025
Tag der Promotion:	28.10.2025

Zusammenfassung

Mathematisch-chemische Begriffe wie „Dichte“ oder „Stoffmenge“ sind zentrale Bestandteile des Chemieunterrichts. Dennoch zeigen Lernende im Umgang mit diesen Begriffen häufig ein überwiegend algorithmisches statt konzeptuelles Verständnis oder entwickeln alternative Vorstellungen. Zusätzlich beklagen Lehrkräfte ein mangelndes Angebot an didaktischen Konzepten zur Vermittlung dieser Begriffe.

Vor diesem Hintergrund war das Ziel der vorliegenden Arbeit die Entwicklung und Evaluation einer Unterrichtskonzeption mit begleitenden Lernmaterialien, die das Verstehen mathematischer Begriffe im Chemieunterricht fördert. Dies erfolgte im Rahmen des Design-Based Research-Ansatzes am Beispiel des Dichtebegriffs.

Die zentrale Idee der Konzeption liegt in der Übertragung des mathematikdidaktischen *Grundvorstellungskonzepts* auf mathematisch-chemische Begriffe sowie dessen Verknüpfung mit dem *Johnstone-Dreieck*. Grundvorstellungen werden dabei als idealtypische, inhaltliche Interpretationen eines Begriffs verstanden, die diesem Sinn geben.

Basierend auf der historischen Entwicklung des Dichtebegriffs, empirischen Studien sowie einer Schulbuchanalyse ($N = 7$) wurden vier Grundvorstellungen zur Dichte hergeleitet und den Ebenen des Johnstone-Dreiecks zugeordnet:

Dichte als Masse eines Einheitswürfels (makroskopisch), Dichte als Maß für den Auftrieb (makroskopisch), Dichte als Gesamtteilchenmasse eines Einheitswürfels (submikroskopisch) und Dichte als Umrechnungsgröße (symbolisch).

Im Rahmen exemplarischer Lernendeninterviews ($N = 5$) konnten die hergeleiteten Grundvorstellungen teilweise als individuelle Vorstellungen bei Lernenden identifiziert und somit eine erste didaktische Relevanz dieser gezeigt werden.

Anschließend erfolgte die umfangreiche Entwicklung der Unterrichtskonzeption und begleitender Lernmaterialien zur Vermittlung der Grundvorstellungen, basierend auf fünf literaturgestützten Designprinzipien. Die Lernmaterialien wurden

durch Expertinnen und Experten ($N = 12$), in einer Pilotierung ($N = 4$) und in zwei Erprobungen im Klassenverband ($N = 35$) evaluiert sowie iterativ optimiert. Einzelne Verbesserungen werden exemplarisch vorgestellt und empirisch begründet.

In zwei abschließenden Erprobungen ($N = 42$) wurde die Wirksamkeit und Funktionalität der Unterrichtskonzeption und der Lernmaterialien überprüft. Die Evaluation erfolgte anhand der Lernmaterialbearbeitung, einer Lernendenbefragung sowie eines Prä-Post-Follow-up-Vergleichs.

Die Wirksamkeit zeigte sich in den teils langfristigen Vorstellungsentwicklungen der Lernenden in Richtung der normativ formulierten Grundvorstellungen. Diese äußerten sich beispielsweise darin, dass Lernende das Auftriebsverhalten in Fluiden stärker mit der Dichte begründeten oder die Invarianz der Dichte gegenüber der Stoffmenge erkennen konnten.

Die Funktionalität der Unterrichtskonzeption spiegelte sich in der intendierten Bearbeitung der Lernmaterialien sowie in den positiven Bewertungen dieser und der Unterrichtskonzeption durch die Lernenden wider.

Unter systematischer Zusammenführung dieser Erkenntnisse wurden Thesen formuliert, die sich auf das Johnstone-Dreieck und das Grundvorstellungskonzept, den Lerngegenstand „Dichte“ sowie die konkreten Designprinzipien und -elemente beziehen.

Insgesamt leistet die vorliegende Arbeit einen wesentlichen Beitrag, das Grundvorstellungskonzept für mathematische Begriffe im Chemieunterricht nutzbar zu machen und dadurch das Verständnis dieser Begriffe nachhaltig zu fördern. Gleichzeitig stehen mit der entwickelten Unterrichtskonzeption und den praxiserprobten, unmittelbar einsetzbaren Lernmaterialien konkrete Unterstützungen für die Unterrichtspraxis zur Verfügung. Die gewonnenen Erkenntnisse und formulierten Thesen bieten darüber hinaus wertvolle Anknüpfungspunkte für die weitere fachdidaktische Forschung.

Danksagung

Während meiner Promotion wurde ich von zahlreichen Menschen unterstützt, denen ich an dieser Stelle herzlich danken möchte.

Ein besonders großer Dank gilt meiner Doktormutter, Prof. Dr. Annette Marohn, die von Anfang an mein Projekt mit großer Begeisterung begleitet und mich stets motiviert sowie unterstützt hat. Ich danke dir von Herzen für die Übernahme des Erstgutachtens, deine humorvolle Art sowie die inspirierenden Gespräche, in denen du dich immer intensiv in meine Fragestellungen hineingedacht und mir hilfreiche Anregungen sowie kreative Ideen gegeben hast.

Des Weiteren danke ich Herrn Prof. Dr. Greefrath für die Übernahme des Zweitgutachtens sowie für die anschauliche Vermittlung des Grundvorstellungskonzepts in seiner Vorlesung. Seine Begeisterung für das Thema hat sich auf mich übertragen und so einen wichtigen Grundstein für diese Arbeit gelegt.

Außerdem danke ich Herrn Prof. Dr. Schukajlow-Wasjutinski für die Teilnahme an der Prüfungskommission.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei allen derzeitigen und ehemaligen Mitarbeitenden des Instituts für Didaktik der Chemie für ihre Unterstützung sowie die herzliche, konstruktive und humorvolle Atmosphäre.

Ein besonderer Dank gilt Joana für unsere harmonische Bürozeit voller anregender Gespräche, gemeinsamer Tottelmomente (Kerzenbeispiel) und viel Lachen.

Danke, Theresa, für den wertvollen fachlichen Austausch zu allen Themen, für deine fürsorgliche Art, mit der du das Institut bereichert hast, und natürlich für das freudige Heranstürmen bis vor meinen Bildschirm.

Danke Valentin, dass du mich immer unterstützt hast, wenn ich mir beim Zerdenken mal wieder selbst im Weg stand; dass du auch über das Promotionsprojekt hinaus eine Begeisterung für „magic“ in mir wecken konntest; dass du die Arbeit kor-

rekturgelesen hast und vor allem – dass aus unserer Zusammenarbeit eine wahre Freundschaft entstanden ist.

Max danke ich für die kreative Ausgestaltung des Jahrmarktbildes.

Ebenso möchte ich allen danken, mit denen mich die Zusammenarbeit am Institut weit über das Promotionsprojekt hinaus verbunden hat.

Ein weiterer Dank gilt allen studentischen Hilfskräften, die mich bei meinem Projekt und den Erprobungen tatkräftig unterstützt haben. Besonders danke ich Nils, auf dessen Unterstützung und IT-Expertise ich sowohl während seiner Zeit als studentische Hilfskraft als auch später während seiner eigenen Promotion stets zählen konnte.

Darüber hinaus danke ich allen Lehrenden und Lernenden, die an meinen Erprobungen teilgenommen und somit die Umsetzung meines Forschungsprojekts überhaupt erst ermöglicht haben.

Zuletzt gilt mein besonderer Dank den Menschen, die mir am nächsten stehen.

Danke, Mama und Papa, für eure bedingungslose Liebe und Unterstützung – nicht nur während der Promotion, sondern in allen Lebensphasen.

Danke, Nadine, dass ich immer auf dich zählen kann. Du bist eine großartige Schwester!

Von ganzem Herzen danke ich dir, Lena, für deine Liebe, das Korrekturlesen meiner Arbeit und dafür, dass du immer für mich da bist und mir den Rücken stärkst.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	XIV
Tabellenverzeichnis	XVII
I Einleitung	1
II Theoretischer Hintergrund	5
1 Mathematische Begriffe im Chemieunterricht	7
1.1 Definition	7
1.2 Relevanz	10
1.3 Das Johnstone-Dreieck als Bindeglied zwischen Mathematik und Chemie	12
1.4 Herausforderungen	17
1.5 Bestehende Ansätze zur Begegnung der Herausforderungen	24
2 Das Grundvorstellungskonzept	31
2.1 Beispiele zu Grundvorstellungen	32
2.2 Merkmale von Grundvorstellungen	37
2.2.1 Die drei Aspekte nach vom Hofe	37
2.2.2 Verschiedene Arten von Grundvorstellungen	39
2.2.3 Mehrere Grundvorstellungen zu einem Begriff	43
2.2.4 Grundvorstellungen als Übersetzungsscharniere	44
2.2.5 Normative, deskriptive und konstruktive Perspektive	45
2.3 Grundvorstellungen im Chemieunterricht	47
2.4 Zwischenfazit	48

3	Vorstellungsentwicklung	51
3.1	Konstruktivistische Perspektive	51
3.2	<i>Conceptual Change</i>	54
3.3	Strategien zur Entwicklung von Vorstellungen	55
3.3.1	Kognitiver Konflikt	55
3.3.2	Genetisches Lernen	57
3.3.3	Darstellungswechsel	63
3.4	Potenzial von Simulationen	73
3.5	Konkrete Modelle und Konzepte zur Vorstellungsentwicklung	77
III	Methodischer Rahmen	85
4	Design-Based Research	87
4.1	Gütekriterien	88
4.2	Verlauf	94
4.2.1	Framing	95
4.2.2	Design-Experiment	96
4.2.3	Re-Framing	98
4.3	Herausforderungen und deren Begegnung	99
5	Methodische Grundlagen	103
5.1	Verfahrensrahmen zur Herleitung von Grundvorstellungen	103
5.2	Datenerhebung	106
5.2.1	Artefakte	106
5.2.2	Interviews	107
5.2.3	Videographien	107
5.2.4	Tests und Fragebögen	108
5.2.5	Expertinnen- und Expertenreview	110
5.3	Datenauswertung	111
5.3.1	Qualitative Inhaltsanalyse	111
5.3.2	Statistische Tests	113

IV Framing	117
6 Ausgangslage und Zielsetzung	119
7 Forschungsfragen	123
V Design-Experiment	129
8 Grundvorstellungen zum Dichtebegriff und Zuordnung zu den Johnstone-Ebenen	131
8.1 Schritt 1: Bestimmung eines Bezugsrahmens	131
8.2 Schritt 2: Sachanalyse des Dichtebegriffs	134
8.3 Schritt 3: Formulierung der Grundvorstellungen	149
8.4 Schritt 4: Präzisierung des Bezugsrahmens	155
8.5 Schritt 5: Evaluation der didaktischen Relevanz	156
9 Das Unterrichtskonzept ma _G ic mit begleitenden Lernmaterialien	171
9.1 Designprinzipien	171
9.2 Konkretisierung der Designprinzipien	175
9.2.1 Phasierung	175
9.2.2 Allgemeiner Aufbau	178
9.2.3 Konkretisierung der Phasen anhand der Würfel- und Auftriebsvorstellung	184
9.2.4 Zusammenfassung	212
9.3 Optimierung der Lernmaterialien	214
9.3.1 Übersicht über die Erprobungen	215
9.3.2 Exemplarische Verbesserungen	224
10 Wirksamkeit und Funktionsweisen der Unterrichtskonzeption	229
10.1 Ablauf der Erprobungen	229
10.1.1 Erprobung (E2)	229
10.1.2 Erprobung (E3)	233
10.1.3 Anmerkung	235
10.2 Bearbeitung der Lernmaterialien	237
10.2.1 Methodik	237

10.2.2	Ergebnisse	240
10.2.3	Diskussion	267
10.2.4	Zusammenfassung und Fazit	282
10.3	Evaluation der Unterrichtskonzeption mit begleitenden Lernmate- rialien	286
10.3.1	Methodik	286
10.3.2	Ergebnisse & Diskussion	291
10.3.3	Zusammenfassung und Fazit	299
10.4	Lernzuwachs Prä-Post-Test	301
10.4.1	Methodik	302
10.4.2	Ergebnisse	307
10.4.3	Diskussion	327
10.4.4	Zusammenfassung & Fazit	336
10.5	Fazit	339
VI	Re-Framing	341
11	Zusammenfassung	343
11.1	Ausgangslage und Zielsetzung	343
11.2	Herleitung der Grundvorstellungen zum Dichtebegriff.	344
11.3	Entwicklung der Unterrichtskonzeption mit begleitenden Lernma- terialien	346
11.4	Wirksamkeit und Funktionsweisen der Unterrichtskonzeption mit begleitenden Lernmaterialien	349
11.4.1	Bearbeitung der Lernmaterialien	350
11.4.2	Evaluation der Unterrichtskonzeption mit begleitenden Lernmaterialien	350
11.4.3	Vorstellungsentwicklung	351
11.4.4	Fazit	352
12	Praktischer Output	361
13	Theoretischer Output	365

14 Reflexion	371
14.1 Reflexion der Gütekriterien des DBR-Ansatzes	371
14.2 Reflexion des methodischen Vorgehens	377
15 Fazit & Ausblick	385
Literaturverzeichnis	423
Liste der eigenen Publikationen	425
 VII Anhang	 427
A Weitere Ergebnisse und Daten	429
A.1 Schwierigkeiten im Umgang mit den Lernmaterialien und vorge- nommene Optimierungen	429
A.2 Antwortmuster zur Aufgabe 3 der Auftriebsvorstellung	444
A.3 Fragen zum Jahrmarktbild (E2)	448
A.4 Transkripte der Plenumsphasen	448
A.4.1 E3	448
A.4.2 E2	453
A.5 Evaluationsergebnisse von E2	458
A.6 Detaillierte Intercoder-Reliabilitäten zur Testauswertung	461
A.7 Ergebnisse statistischer Tests	462
A.7.1 Ergebnisse E3	462
A.7.2 Ergebnisse E2	465
 B Materialien zur Unterrichtskonzeption ma_Gic	 466
B.1 Würfelvorstellung	466
B.2 Auftriebsvorstellung	470
B.3 Teilchenvorstellung	474
B.4 Umrechnungsvorstellung	476
B.5 Merkzettel	478
B.6 Vernetzung	480

C	Codierleitfäden	483
C.1	Herleitung der Grundvorstellungen zur Dichte	483
C.2	Lösungsstrategien zur Bestimmung des „schwersten“ Stoffes (Aufgabe 1b, Würfelvorstellung)	493
C.3	Ablenkungen	497
C.4	Testauswertung	499
D	Erhebungs- und Auswertungsinstrumente	520
D.1	Interviewleitfaden	520
D.2	Prä-Post-Test	524
D.3	Fragebogen	526
D.4	Musterlösung und Punktesystem (Artefakte)	528
D.4.1	Würfelvorstellung	528
D.4.2	Auftriebsvorstellung	530
E	Unterrichtsverlaufspläne	533
E.1	E0 und E1	533
E.2	E2	535
E.3	E3	539
F	Digitaler Anhang	542
	Lebenslauf	543

Abbildungsverzeichnis

1.1	Das chem:LEVEL-Dreieck	15
1.2	Schichtstruktur zur Erweiterung des Johnstone-Dreiecks	16
2.1	Grundvorstellungen als Übersetzungsscharniere zwischen Darstellungen	45
3.1	Modell zur Ausbildung von Grundvorstellungen	78
4.1	Strukturmodell zur Beschreibung eines idealtypischen Verlaufs von DBR-Projekten	95
5.1	Die fünf Schritte zur Herleitung von Grundvorstellungen (Salle & Clüver, 2021) in einer zyklischen Darstellung	104
8.1	Übersicht über die hergeleiteten Grundvorstellungen zur Dichte und deren Zuordnung zu den Johnstone-Ebenen	152
9.1	Phasierung der Unterrichtskonzeption ma _{gic}	176
9.2	Grundlegender Aufbau der Website	180
9.3	Ausschnitt aus den Lernmaterialien: AR-basierte Vernetzung der Johnstone-Ebenen unter Vermeidung ihrer Vermischung	181
9.4	Grundlegender Aufbau der Simulationen in den Lernmaterialien am Beispiel der Teilchenvorstellung	182
9.5	Beispiel für eine Lernhilfe	184
9.6	Cartoon der Phase des Fragens	185
9.7	Ausschnitt aus der Aufgabe 1b der Würfelvorstellung	188
9.8	Aufgabe 2 der Würfelvorstellung (Reflexionsaufgabe)	190
9.9	Aufgabe 3a der Würfelvorstellung	191
9.10	Aufgabe 3b der Würfelvorstellung	192

9.11	Aufgabe 4 der Würfelvorstellung	193
9.12	Merkzettel der Würfelvorstellung	194
9.13	Aufgabe 5a der Würfelvorstellung	196
9.14	Ausschnitt aus der Aufgabe 6 der Würfelvorstellung	197
9.15	Ausschnitt aus der Aufgabe 7a der Würfelvorstellung	198
9.16	Aufgabe 7b der Würfelvorstellung	199
9.17	Ausschnitt aus der Aufgabe 1b der Auftriebsvorstellung	201
9.18	Aufgabe 2 der Auftriebsvorstellung (Reflexionsaufgabe)	202
9.19	Aufgabe 3 der Auftriebsvorstellung	203
9.20	Merkzettel der Auftriebsvorstellung	205
9.21	Aufgabe 4b der Auftriebsvorstellung	207
9.22	Aufgabe 5b der Auftriebsvorstellung mit idealtypischer Lösung	207
9.23	Simulation der Vernetzungsaufgabe „Die magische Traube“ . .	208
9.24	Ausschnitt aus der Teilaufgabe d) der Vernetzungsaufgabe „Die magische Traube“	210
9.25	Ausschnitt aus der Teilaufgabe a) der Vernetzungsaufgabe „Die Dichteanomalie von Wasser“	211
9.26	Teilaufgabe b) der Vernetzungsaufgabe „Die Dichteanomalie von Wasser“	211
9.27	Ausschnitt aus dem in E0 verwendeten Beobachtungsbogen . .	222
9.28	Ausschnitt aus der ersten Version der Aufgabe 3 der Würfelvor- stellung	225
9.29	Erste Version der Aufgabe 3b der Würfelvorstellung	227
9.30	Vergleich der ersten Version (links) mit der aktuellen Version (rechts) eines Arbeitsblattes der Würfelvorstellung	228
10.1	Überblick über die Anordnung der Lernenden und die Vollständig- keit der Datensätze in E2	232
10.2	Überblick über die Anordnung der Lernenden und die Vollständig- keit der Datensätze in E3	236
10.3	Verteilung der erreichten Punkte in Prozent der maximalen Punkt- zahl bei den Aufgaben zur Würfelvorstellung (E3)	241
10.4	Lösung von S15_E3 zur Aufgabe 3a der Würfelvorstellung als Bei- spiel für die am häufigsten freigelassenen Lücken	242

10.5	Lösung von S19_E3 des Merktzettels der Würfelvorstellung als Beispiel für die am häufigsten freigelassenen Lücken	245
10.6	Lösung von S5_E3 zur Aufgabe 5a der Würfelvorstellung als Beispiel für einen häufigen Fehler im letzten Berechnungsschritt	246
10.7	Fehlerhafte Lösung von S20_E3 zur Aufgabe 7a der Würfelvorstellung	246
10.8	Korrekte Lösung von S7_E3 zur Aufgabe 7b der Würfelvorstellung	247
10.9	Verteilung der erreichten Punkte in Prozent der maximalen Punktzahl bei den Aufgaben zur Würfelvorstellung (E2)	248
10.10	Verteilung der erreichten Punkte in Prozent der maximalen Punktzahl bei den Aufgaben zur Auftriebsvorstellung (E3)	249
10.11	Falsche Lösung von S23_E3 zur Aufgabe 3 der Auftriebsvorstellung	250
10.12	Verteilung der erreichten Punkte in Prozent der maximalen Punktzahl bei den Aufgaben zur Auftriebsvorstellung (E2)	252
10.13	Zusammenhang zwischen der Ablenkungszeit und der individuellen Gesamtpunktzahlen der Lernenden	253
10.14	Fragen zu den Situationen auf dem Jahrmarktbild	254
10.15	Ausschnitt des verwendeten Fragebogens	288
10.16	Überblick über positive und verbesserungswürdige Aspekte der Unterrichtskonzeption mit begleitenden Lernmaterialien aus Sicht der Lernenden	298
10.17	Vergleich der Gesamtpunktzahl von Prä-, Post- und Follow-up-Test	308
10.18	Vergleich der itemspezifischen Ergebnisse von Prä-, Post- und Follow-up-Test	309
10.19	Vergleich der Begründungen für den Auftrieb in Flüssigkeiten (Item 1)	310
10.20	Vergleich der hergestellten Relationen zum umliegenden Stoff für den Auftrieb in Flüssigkeiten	312
10.21	Vergleich der Begründungen für den Auftrieb in Gasen (Item 2)	313
10.22	Vergleich der hergestellten Relationen zum umliegenden Stoff für den Auftrieb in Gasen	314
10.23	Vergleich der Begründungen in Item 1 und Item 2	316

10.24	Vergleich der Anzahl der Aspekte zur Dichte	317
10.25	Vergleich und Bepunktung der genannten Aspekte zur Dichte .	317
10.26	Verteilung der Subcodes zur Kategorie „Relation zu Masse und Volumen“	319
10.27	Vergleich der Antworten zur Stoffinvarianz der Dichte	320
10.28	Vergleich der Begründungen zur Stoffmengeninvarianz der Dichte	322
10.29	Vergleich der Anzahl der Interpretationen eines Dichtewertes .	324
10.30	Vergleich und Bepunktung der Hauptcodes für die Interpretationen eines Dichtewertes	325
10.31	Verteilung der Subcodes zu Item 5	326
12.1	Übersicht über die entwickelten Lernmaterialien	362
A.1.1	Feedback der Expertinnen und Experten zum Jahrmarktbild . .	443
A.3.1	Fragen zu den Situationen auf dem Jahrmarktbild (E2)	447
A.7.1	Vergleich der Gesamtpunktzahl von Prä- und Post-Test (E2) . .	464
A.7.2	Vergleich der itemspezifischen Ergebnisse von Prä- und Post-Test (E2)	465

Tabellenverzeichnis

3.1	Zusammenhang zwischen den Johnstone-Ebenen und den Darstellungsebenen nach Leisen anhand von Beispielen	66
8.1	Intercoder-Reliabilitäten der Schulbuchanalyse	141
8.2	Häufigkeiten und Beispiele der Subcodes für die Aussagen/Erläuterungen und Aufgaben der 1. Klasse	143
8.3	Häufigkeiten und Beispiele der Subcodes für die Aussagen/Erläuterungen und Aufgaben der 2. Klasse	145
8.4	Häufigkeiten und Beispiele der Subcodes für die Aussagen/Erläuterungen und Aufgaben der 3. Klasse	147
8.5	Häufigkeiten und Beispiele der Subcodes für die Aussagen/Erläuterungen und Aufgaben der 4. Klasse	148
8.6	Überblick über die Stichprobe	157
8.7	Einblick in die Orientierung der Problemfragen an Ergebnissen der Literatur- und Schulbuchanalyse am Beispiel der Würfelvorstellung	158
8.8	Kernaussagen der Lernenden zu Problemfragen der Würfelvorstellung	160
8.9	Kernaussagen der Lernenden zu Problemfragen der Auftriebsvorstellung	163
8.10	Begründungen der Lernenden zu Dichtevergleichen auf der Teilchenebene	166
9.1	Übersicht über die Designelemente der Unterrichtskonzeption und deren intendierte Funktion	212
9.2	Übersicht über alle durchgeführten Erprobungen der entwickelten Lernmaterialien	216

10.1	Antworten und deren Häufigkeiten zur Aufgabe 4 der Würfelvorstellung	243
10.2	Übersicht über die Codes und deren Häufigkeiten zur Codierung der Art der Strategien	258
10.3	Übersicht über die Codes und deren Häufigkeiten zur Codierung der Beschreibung der Strategien mithilfe von Würfeln oder dem Volumen	260
10.4	Häufigkeiten der Vermutungen und Begründungen zur Aufgabe 1a der Auftriebsvorstellung	261
10.5	Häufigkeiten der Vermutungen und Begründungen zur Aufgabe 1b der Auftriebsvorstellung	262
10.6	Zuordnung der Items zu den Funktionsweisen der Designelemente	289
10.7	Antworthäufigkeiten zur Bewertung der allgemeinen Struktur und Verständlichkeit der Lernmaterialien	291
10.8	Antworthäufigkeiten zur Bewertung des Schwierigkeitsgrades der Lernmaterialien	292
10.9	Antworthäufigkeiten zur Bewertung des Spaßfaktors bei Aufgaben, Simulationen und Experimenten	293
10.10	Antworthäufigkeiten zur Bewertung der Strukturierungselemente	294
10.11	Antworthäufigkeiten zur Bewertung der Funktion von Designelementen	295
10.12	Antworthäufigkeiten zur Bewertung der Verständlichkeit und Nützlichkeit der Würfel- und Auftriebsvorstellung	296
10.13	Übersicht über die Items der Prä-, Post- und Follow-up-Tests .	303
10.14	Übersicht der Haupt- und Subcodes für die Kodierung der Prä-, Post- und Follow-up-Tests	305
11.1	Übersicht über die vier Grundvorstellungen der Dichte und deren Zuordnung zu den Johnstone-Ebenen	345
11.2	Übersicht über die empirischen Hinweise auf die Funktionalität der Designelemente der Unterrichtskonzeption	353

A.1.1	Übersicht über die Schwierigkeiten im Umgang mit den Lernmaterialien und vorgenommenen Optimierungen	430
A.2.1	Antwortmuster zur Aufgabe 3 der Auftriebsvorstellung (E3) . .	445
A.2.2	Antwortmuster zur Aufgabe 3 der Auftriebsvorstellung (E2) . .	446
A.5.1	Antworthäufigkeiten zur Bewertung der Unterrichtskonzeption mit begleitenden Lernmaterialien (E2)	459
A.6.1	Intercoder-Reliabilitäten der Testauswertung nach den drei Codierprozessen auf verschiedenen Codeebenen	461
A.7.1	Detaillierte Ergebnisse des Friedman-Tests und der Conover-Post-hoc-Tests für die itemspezifischen Analysen von E3	463
A.7.2	Detaillierte Ergebnisse der Wilcoxon-Tests für die itemspezifischen Analysen von E2	465

Teil I

Einleitung

Einleitung

„Formeln? Ich hatte das in der 7. Klasse Online-Unterricht glaub ich. Und da haben wir sehr viel zu Formeln gemacht, das weiß ich noch“ (S4, Interview).

Mit diesen Worten antwortete eine Schülerin auf die Frage, was sie mit dem Begriff „Dichte“ verbindet. Statt eine anschauliche, inhaltlich tragfähige Bedeutung zu assoziieren, verweist sie in erster Linie auf eine Formel. Dieses Beispiel veranschaulicht eine zentrale Herausforderung im Umgang mit mathematischen Begriffen im Chemieunterricht wie etwa der Dichte oder der Stoffmenge: Oft werden diese Begriffe nicht konzeptuell durchdrungen, sondern vorwiegend mit rechnerischen Prozeduren und Formeln verknüpft. Dies wird durch zahlreiche Untersuchungen gestützt, in denen Lernende algebraisch lösbare Aufgaben deutlich häufiger korrekt lösten als konzeptuelle Fragestellungen (BouJaoude et al., 2004; Nakhleh, 1993; Nakhleh & Mitchell, 1993; Nurrenbern & Pickering, 1987; Papaphotis & Tsaparlis, 2008; Salta & Tzougraki, 2011).

Doch auch für Lehrkräfte erweist sich der Umgang mit mathematischen Begriffen im Chemieunterricht als herausfordernd. So beklagen diese, dass „zu wenig didaktische Konzepte und Überlegungen existieren, wie mathematische Betrachtungen im Unterricht vorgenommen werden könnten“ (Goldhausen & Di Fuccia, 2015, S. 131).

Trotz der genannten Herausforderungen ist die Auseinandersetzung mit mathematischen Begriffen im Chemieunterricht von großer Bedeutung: Sie sind in den Bildungsstandards für das Fach Chemie (KMK, 2024) fest verankert und bilden eine Grundlage für das vertiefte Verständnis chemischer Inhalte (Schanze & Parchmann, 2013). Zudem können mathematische Betrachtungen im Chemieunterricht nicht nur die Mathematik- und Chemieleistungen (Judson & Sawada, 2000; Preininger, 2017), sondern auch die Einstellungen von Lernenden gegenüber der Mathematik positiv beeinflussen (Preininger, 2017).

Angesichts des Potenzials mathematischer Begriffe im Chemieunterricht einerseits und den damit verbundenen Herausforderungen andererseits, stellt sich die Frage, wie das Verstehen dieser Begriffe im Chemieunterricht gefördert werden kann.

Vor diesem Hintergrund entwickelt, erprobt, optimiert und untersucht die vorliegende Arbeit im Rahmen des Design-Based Research-Ansatzes eine Unterrichtskonzeption mit begleitenden Lernmaterialien, die das Verstehen mathematischer Begriffe im Chemieunterricht fördern sollen.

Die Arbeit gliedert sich in mehrere Teilbereiche. Nach der Einleitung werden in Teil II der Forschungsstand zum Umgang mit mathematischen Begriffen im Chemieunterricht sowie die theoretischen Grundlagen und bestehende fachdidaktische Überlegungen vorgestellt (Kapitel 1 bis 3). In Teil III folgt eine detaillierte Beschreibung des Design-Based Research-Ansatzes (Kapitel 4) sowie die Darstellung der verwendeten Methoden (Kapitel 5). Anschließend werden in Teil IV die Ausgangslage und Zielsetzung (Kapitel 6) sowie die zentralen Forschungsfragen (Kapitel 7) dieser Arbeit erläutert. Der Kern dieser Arbeit ist das Design-Experiment (Teil V): Aufbauend auf einer fachdidaktischen Grundlagenarbeit (Kapitel 8) werden das entwickelte Unterrichtskonzept und die dazugehörigen Materialien vorgestellt (Kapitel 9) sowie die Wirksamkeit und Funktionsweise empirisch evaluiert (Kapitel 10). Abschließend werden im letzten Teil die wesentlichen Erkenntnisse (Kapitel 11) und der praktische wie theoretische Output (Kapitel 12 und Kapitel 13) zusammengefasst, das methodische Vorgehen reflektiert (Kapitel 14) und ein Fazit mit Ausblick gegeben (Kapitel 15).

Teil II

Theoretischer Hintergrund

1 Mathematische Begriffe im Chemieunterricht

In diesem Kapitel wird die Rolle mathematischer Begriffe im Chemieunterricht näher beleuchtet. Dazu wird zunächst geklärt, was unter mathematischen Begriffen im Chemieunterricht zu verstehen ist (siehe Abschnitt 1.1) und warum diese für das Lernen von Chemie relevant sind (siehe Abschnitt 1.2). Anschließend wird das Johnstone-Dreieck vorgestellt und seine zentrale Bedeutung für mathematische Begriffe im Chemieunterricht herausgearbeitet (Abschnitt 1.3). Abschließend wird der aktuelle Forschungsstand beleuchtet, indem Herausforderungen (siehe Abschnitt 1.4) und Lösungsansätze (siehe Abschnitt 1.5) im Umgang mit mathematischen Begriffen im Chemieunterricht vorgestellt werden.

1.1 Definition

In diesem Abschnitt soll geklärt werden, was unter *mathematischen Begriffen im Chemieunterricht* konkret zu verstehen ist. Dafür ist es zunächst notwendig, zu definieren, was überhaupt unter einem Begriff zu verstehen ist. Anschließend werden grundlegende Aspekte der Begriffsbildung und des Begriffsverständnisses dargestellt, bevor eine Definition für den weiteren Verlauf dieser Arbeit formuliert wird.

Begriffe, Zeichen und Objekte Einen ersten Zugang zur Begriffsbildung bietet das semiotische Dreieck, das die drei Begriffe *Zeichen*, *Objekt* sowie *Begriff* unterscheidet und diese in Beziehung setzt. Unter Zeichen wird lediglich das Begriffswort verstanden, das einen Begriff bezeichnet. Der Begriff selbst ist „das Spektrum der Zuweisungen, die das einzelne Individuum in unterschiedlichen Kontexten einem Zeichen gibt, in der Kommunikation mit anderen Subjekten abgleicht und im Gebrauch expliziert“ (Laakmann, 2013, S. 13). Die Zuweisung von Bedeutungen

erfolgt im Zusammenspiel mit dem Objekt, welches als Konkretisierung eines Begriffs in Form von Definitionen oder Darstellungen verstanden werden kann (Rembowski, 2015). So konstruieren Lernende beispielsweise den Begriff *Würfel*, indem sie Bedeutungen und Eigenschaften konkreter Objekte, wie z. B. eines Spielwürfels oder geometrischen Modells, auf das Zeichen „Würfel“ übertragen und dieses dadurch mit Bedeutung versehen (Laakmann, 2013). Ein Objekt muss allerdings nicht zwingend wie in diesem Fall ein konkreter Gegenstand sein, sondern kann auch abstrakter Natur sein. Beispielsweise kann der Begriff *Zufall* lediglich durch abstrakte Objekte in Form stochastischer Ereignisse erfasst werden (Rembowski, 2015).

Individuelle vs konventionelle Begriffe In der obigen Definition von Laakmann (2013) wird deutlich, dass Begriffe *individuell* gebildet werden. Je nach der Ausprägung persönlicher Merkmale, wie zum Beispiel Vorwissen, Emotionen und Erfahrungen, weist ein Individuum einem Zeichen unterschiedliche Bedeutungen zu. Die gebildeten Begriffe sind daher immer subjektiv geprägt. Für eine eindeutige Kommunikation ist jedoch ein gemeinsames Begriffsverständnis notwendig. Dies spiegelt sich in *konventionellen* Begriffen wider, die sich über einen längeren Zeitraum kommunikativ herausgebildet haben und deren Bedeutung von mehreren Personen geteilt wird. Konventionelle Begriffe haben somit normativen Charakter und legen fest, was unter einem bestimmten Begriff zu verstehen ist. Eine Annäherung individueller an konventionelle Begriffe erfolgt durch die Abgleichung der Begriffe im sozialen Austausch (Laakmann, 2013).

Begriffsverständnis Zum Verständnis eines Begriffs gehört mehr als nur das Kennen einer Definition. So zählt Weigand (2015) unter anderem (a) Wissen und Vorstellungen über Eigenschaften und Merkmale eines Begriffs, (b) Kenntnisse über die Beziehungen eines Begriffs zu anderen Begriffen sowie (c) das Verfügen über Fähigkeiten im Umgang und in der Anwendung des Begriffs zum Begriffsverständnis dazu.

Eine wichtige Unterscheidung im Zusammenhang mit dem Begriffsverständnis, die sowohl in der mathematik- als auch in der chemiedidaktischen Literatur getroffen wird, ist die zwischen *konzeptuellem* Wissen und *prozeduralem* Wissen. Es existieren viele weitere Zweiteilungen dieser Art mit verschiedensten Bezeichnungen (sie-

he Schneider, 2006, für eine ausführliche Darstellung), die im Kern jedoch gemeinsame Bedeutung teilen:

Konzeptuelles Wissen bezieht sich auf tiefgreifendes, vernetztes Wissen, das Verständnis über die zugrundeliegenden Prinzipien und Strukturen eines Begriffs beinhaltet (Schneider, 2006). Es ermöglicht insbesondere (a) die Anwendung von Begriffen in neuen Situationen (Transfer), (b) die Lösung realer Probleme, die mit Standardalgorithmen nicht lösbar sind, sowie (c) die Übersetzung zwischen verschiedenen Darstellungen (Holme et al., 2015).

Prozedurales Wissen hingegen bezieht sich auf das Wissen darüber, wie Aufgaben durch bestimmte Prozeduren (Algorithmen, Techniken und Methoden) schrittweise gelöst werden können (L. W. Anderson & Krathwohl, 2001; Schneider, 2006). Es umfasst zudem die Kenntnisse darüber, unter welchen Bedingungen die Prozeduren angewendet werden können (L. W. Anderson & Krathwohl, 2001).

Alternativ formuliert adressiert das konzeptuelle Wissen die Frage nach dem „Was“ oder „Warum“, während sich das prozedurale Wissen auf das „Wie“ bezieht (L. W. Anderson & Krathwohl, 2001; Schneider, 2006).

Theoretische Begriffe Mathematische Begriffe sind stets theoretische Begriffe. Im Gegensatz zu Begriffen wie „Stuhl“ oder „Tisch“ haben sie keine direkt wahrnehmbaren Entsprechungen (Laakmann, 2013). Selbst geometrische Begriffe wie „Würfel“ oder „Gerade“, die durch geometrische Darstellungen veranschaulicht werden können, bleiben theoretisch. Ihre Veranschaulichungen sind lediglich Modelle und keine direkten Entsprechungen der Begriffe. So kann beispielsweise eine gezeichnete Linie die Steigung und die fehlende Krümmung einer Geraden verdeutlichen, aber nicht deren Unendlichkeit darstellen (Reiners & Struwe, 2011).

Modelle und Darstellungen sind dennoch unverzichtbare Hilfsmittel, um Lernenden den Zugang zu theoretischen Begriffen zu erleichtern (Herron, 1975).

Theoretische Begriffe existieren nicht nur in der Mathematik, sondern lassen sich ebenso in der Chemie finden (Reiners & Struwe, 2011). Beispiele hierfür sind „Atom“ oder „Elektronenpaarbindung“.

Mathematische Begriffe im Chemieunterricht Da sowohl chemische als auch mathematische Begriffe theoretisch sein können, stellt dies kein hinreichendes Kriterium dar, um festzulegen, was unter *mathematischen Begriffen im Chemieunter-*

richt zu verstehen ist. Stattdessen werden in dieser Arbeit all diejenigen Begriffe im Chemieunterricht als mathematisch verstanden, die eine Quantifizierung chemischer Zusammenhänge ermöglichen und sich durch Berechnungen und Gleichungen beschreiben lassen. Dazu zählen insbesondere Größen wie die Dichte, die Stoffmenge oder der pH-Wert. Auch Begriffe wie „Summenformel“ oder „Reaktionsgleichung“ sind mathematisch, da sie Verhältnisse zwischen chemischen Verbindungen sowie innerhalb dieser Verbindungen ausdrücken.

In der vorliegenden Arbeit wird für mathematische Begriffe im Chemieunterricht synonym die Bezeichnung *mathematisch-chemische Begriffe* verwendet.

1.2 Relevanz

Bereits in der Einleitung dieser Arbeit wurde die Relevanz mathematischer Betrachtungen im Chemieunterricht angedeutet. Diese soll im Folgenden vertieft werden.

Curriculare Perspektive Die Mathematik gilt als ein unerlässliches Werkzeug zur Beschreibung naturwissenschaftlicher Phänomene. Daher ist es nachvollziehbar, dass mathematische Betrachtungen fest in den aktuellen Bildungsstandards im Fach Chemie bereits für den mittleren Schulabschluss verankert sind. Dies findet sich in den Kompetenzbereichen der Erkenntnisgewinnung und der Kommunikation wieder. So sollen Lernende „mathematische Modelle zur Beschreibung chemischer Sachverhalte“ (KMK, 2024, S. 11) anwenden sowie zur Darstellung ihrer Position „ein breites Spektrum an Mitteln (z. B. verbal, symbolisch, mathematisch)“ (KMK, 2024, S. 12) verwenden. Aber auch bei den verbindlichen Inhalten werden „einfache stöchiometrische Betrachtungen als mathematische Modellierung des Reaktionsgeschehens“ (KMK, 2024, S. 15) vorgeschrieben.

Mit dem Übergang zur Sekundarstufe II nimmt die Anzahl der Forderungen nach mathematischen Betrachtungen deutlich zu. Dies bestätigt eine umfassende Analyse der Kernlehrpläne im Fach Chemie aller Bundesländer für die Sekundarstufe II von Goldhausen und Di Fuccia (2015). Für das Bundesland Nordrhein-Westfalen ergab die Analyse, dass bei mehr als der Hälfte der im Kernlehrplan genannten Themen auf eine mathematische Betrachtung hingewiesen wird. Dieser hohe Anteil

spiegelt sich zudem in den von Goldhausen und Di Fuccia (2015) analysierten Schulbüchern und Abiturklausuren wider. Insgesamt kann demnach der Stellenwert mathematischer Betrachtungen im Chemieunterricht als hoch eingestuft werden.

Fachdidaktische Perspektive Auch aus fachdidaktischer Perspektive wird mathematischen Betrachtungen im Chemieunterricht ein großer Nutzen zugeschrieben.

So zeigen Schanze und Parchmann (2013) in ihrem Beitrag exemplarisch auf, „dass ein vertieftes Verständnis chemischer Konzepte ohne Mathematisierungen nicht auskommt und dass an vielen Stellen auf mathematisches Grundwissen zurückgegriffen wird“ Schanze und Parchmann (2013, S. 7). Sie sehen dies als eine Chance, Lernenden durch Explikation dieser Bezüge den Mehrwert mathematischer Betrachtungen deutlich zu machen.

Schmidt (1992) hebt in seinem Plädoyer für das stöchiometrische Rechnen ebenfalls den Nutzen quantitativer Betrachtungen im Chemieunterricht hervor. Diesen sieht er insbesondere darin, quantitative Vorhersagen über beliebige Reaktionen und daran beteiligten Stoffen treffen zu können.

Hörnig und Habelitz-Tkotz (2015) betonen dagegen die Möglichkeit, mithilfe des chemischen Rechnens an die Lebenswelt der Lernenden anzuknüpfen. Bereits im Chemieanfangsunterricht können alltagsnahe Gehaltsgrößen wie der Massenanteil in Fettgehaltsangaben von Milchprodukten, die Massenkonzentration bei Mineralwasser und die Volumenkonzentration bei alkoholischen Getränken thematisiert und entsprechende Rechenaufgaben dazu gelöst werden. Letzteres könnte aus Sicht der Verfassenden einen wichtigen Beitrag zur Alkoholprävention leisten.

Wohlmuth (2007) sieht in der mathematischen Betrachtung chemischer Inhalte das Potenzial zur Förderung des abstrakten Denkens, das er als Grundvoraussetzung für das Lösen komplexer, gesellschaftlich relevanter Probleme erachtet.

Empirische Perspektive Neben den dargelegten fachdidaktischen Argumenten gibt es auch einige wenige empirische Untersuchungen, die auf eine positive Wirkung von der Integration mathematischer Betrachtungen im Chemieunterricht hinweisen.

Beispielsweise deutete sich in einer explorativen Untersuchung von Preininger (2017) an, dass eine zusätzliche Betonung mathematischer Betrachtungen im Che-

mieunterricht die Einstellungen von Lernenden gegenüber der Mathematik, sowie deren Chemiekenntnisse positiv beeinflussen kann.

Die Ergebnisse einer Untersuchung von Judson und Sawada (2000) im Rahmen der Aktionsforschung weisen zudem darauf hin, dass eine Integration von Mathe und Chemie auch umgekehrt einen positiven Einfluss auf die Mathematikkenntnisse der Lernenden haben kann.

Diese Erkenntnisse werden durch eine Metaanalyse von Becker und Park (2011) bestärkt, die ergab, dass eine Integration von Mathematik und Naturwissenschaften im Allgemeinen die Leistungen in beiden Fachbereichen positiv beeinflussen kann.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass mathematische Betrachtungen im Chemieunterricht aus curricularer, fachdidaktischer sowie empirischer Sicht von zentraler Bedeutung sind.

1.3 Das Johnstone-Dreieck als Bindeglied zwischen Mathematik und Chemie

„Johnstone’s triangle has in effect become a ‘taken-for-granted’ commitment (or assumption) for those working in the field of chemistry education“ (Taber, 2013, S. 156).

Das Johnstone-Dreieck kann somit als eine zentrale Grundlage für den Chemieunterricht betrachtet werden und spielt auch bei der Betrachtung mathematisch-chemischer Begriffe eine zentrale Rolle. Es symbolisiert die drei durch seinen Namensgeber definierten Ebenen, auf denen chemische Fachinhalte betrachtet werden können: die makroskopische, die submikroskopische und die symbolische Ebene (Johnstone, 1991; Johnstone, 2000).

Definition Im Laufe der Zeit haben sich aufgrund mehrfacher Adaptionen und Reinterpretationen verschiedenste Bezeichnungen und teils widersprüchliche Definitionen der drei Ebenen entwickelt (Talanquer, 2011). Aus diesem Grund werden zunächst, in Anlehnung an Johnstone (2000) und Talanquer (2011), die drei Ebenen für die vorliegende Arbeit wie folgt definiert und voneinander abgegrenzt:

Die *makroskopische* Ebene umfasst alle direkt oder indirekt durch geeignete Hilfsmittel wahrnehmbaren Phänomene. Beispielsweise stellt das Gefrieren von Wasser ein direktes Phänomen dar, da es direkt beobachtet werden kann. Die Änderung des pH-Werts bei einer chemischen Reaktion wird jedoch erst mithilfe eines Hilfsmittels (z. B. eines Indikators) wahrnehmbar und stellt somit ein indirektes Phänomen dar. Darüber hinaus werden auch Erklärungen der makroskopischen Ebene zugeordnet, die sich auf direkt und indirekt wahrnehmbare Konzepte stützen. Ein Beispiel dafür wäre die Erklärung für das bei steigender Temperatur sichtbare Ausdehnen eines Ballons mithilfe des ansteigenden internen Gasdrucks (Talanquer, 2011).

Die *submikroskopische* Ebene umfasst, wie von Gilbert und Treagust (2009) beschrieben, alles das, was selbst mit einem Mikroskop nicht mehr wahrnehmbar ist und mithilfe von Modellen veranschaulicht werden muss. Dazu zählen beispielsweise Atome, Ionen und chemische Bindungen. Aufgrund der fehlenden Wahrnehmbarkeit submikroskopischer Objekte handelt es sich dabei stets um theoretische Begriffe.

Zur *symbolischen* Ebene gehören Formeln, Symbole, Graphen und Gleichungen (Johnstone, 2000). Diese Komponenten repräsentieren Aspekte der makroskopischen, der submikroskopischen oder beider Ebenen zugleich (Taber, 2013). Als Beispiel für Letzteres nennt Taber (2013) Reaktionsgleichungen: Auf der makroskopischen Ebene repräsentieren sie, welche Stoffe miteinander zu neuen Stoffen reagieren, während sie auf submikroskopischer Ebene darstellen, in welchem Verhältnis Atome und Moleküle chemischer Verbindungen miteinander reagieren. Diese Zweideutigkeit sieht Taber (2013) als eine Art Brücke zwischen der makroskopischen und submikroskopischen Ebene, die einen Wechsel zwischen diesen beiden Ebenen unterstützt.

Probleme der Ebenenvermischung und didaktische Konsequenzen Im Umgang mit den drei Ebenen merkt Johnstone (2000) an, dass erfahrene Chemikerinnen und Chemiker sich gedanklich auf allen drei Ebenen gleichzeitig bewegen können. Bei Lernenden hingegen sieht er die Gefahr einer kognitiven Überlastung und das Entwickeln von alternativen Vorstellungen, wenn im Unterricht alle drei Ebenen gleichzeitig betrachtet und miteinander vermischt werden. Beispiele da-

für sind Vermischungen zwischen der makroskopischen und submikroskopischen Ebene, die zu einer Übertragung makroskopischer Eigenschaften (z. B. die Farbe von Stoffen) auf Teilchen oder zu alternativen Vorstellungen im Bereich der Diskontinuumstheorie führen können (Haas, 2021). Problematische Vermischungen können dabei sowohl sprachlicher Natur sein, wie die Aussage „Zink gibt Elektronen ab“ statt „ein Zink-Atom gibt Elektronen ab“ verdeutlicht (Haas, 2021), als auch in Darstellungen auftreten. Ein Beispiel hierfür ist die Darstellung von Atomen in der entsprechenden Farbe des makroskopisch wahrnehmbaren Stoffes (Barke et al., 2018).

Zur Vermeidung solcher Verständnisschwierigkeiten sollten die Ebenen im Unterricht klar voneinander getrennt (Haas, 2021) und Ebenenwechsel deutlich signalisiert werden (Taber, 2009). Gleichzeitig ist jedoch zu beachten, dass für ein vertieftes Verständnis chemischer Fachinhalte eine separate Betrachtung der Ebenen nicht ausreichend ist und ein Verknüpfen dieser erfordert (Nakoinz, 2015; Treagust et al., 2003).

Um diesen Forderungen gerecht zu werden, entwickelten Haas und Marohn (2022) das chem:LEVEL-Dreieck (siehe Abbildung 1.1).

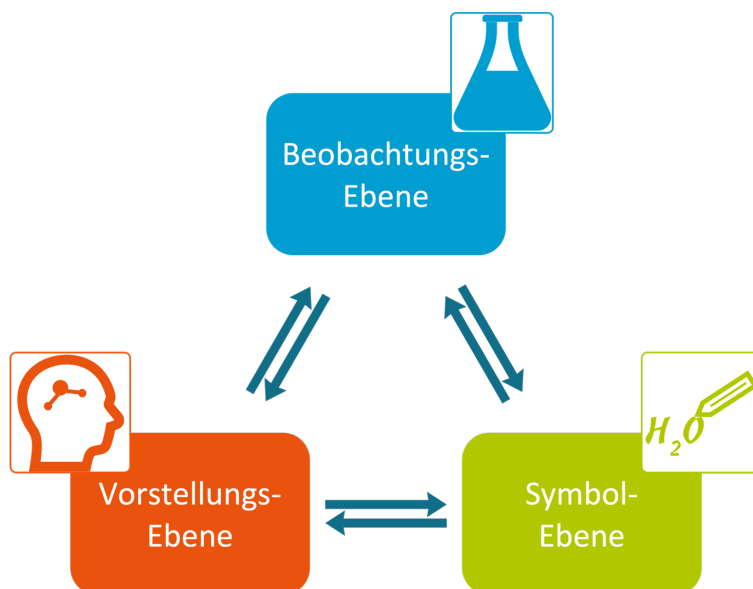
In diesem werden die drei Ebenen lernendenfreundlich benannt sowie mit eindeutigen Farben und Symbolen gekennzeichnet, um die Zugänglichkeit für Lernende zu erhöhen und einen transparenten Umgang mit den Ebenen im Unterricht zu ermöglichen.

Beziehung zwischen Mathematik und Johnstone-Dreieck Hinsichtlich der Beziehung zwischen der Mathematik und dem Johnstone-Dreieck, lassen sich in der Literatur verschiedene Ansätze finden.

Johnstone selbst ordnet mathematische Gleichungen und Manipulationen der symbolischen Ebene zu (Johnstone, 1991; Johnstone, 2000). Diese Ansicht wird dadurch gestützt, dass Fach, Endres et al. (2006) die Mathematik als „Brücke“ oder „Brückenpfeiler“ zwischen der makroskopischen und submikroskopischen Ebene bezeichnen und Taber (2013) diese Funktion der Symbolebene zuschreibt. Als Beispiel für eine mathematische Brücke geben Fach, Endres et al. (2006) die Beziehung $m = M \cdot n$ an, welche die Masse m als makroskopische Größe mit den beiden submikroskopischen Größen Stoffmenge n und molare Masse M verknüpft. Fach,

Abbildung 1.1

Das chem:LEVEL-Dreieck



Anmerkung. Übernommen aus Haas und Marohn (2022, S. 215).

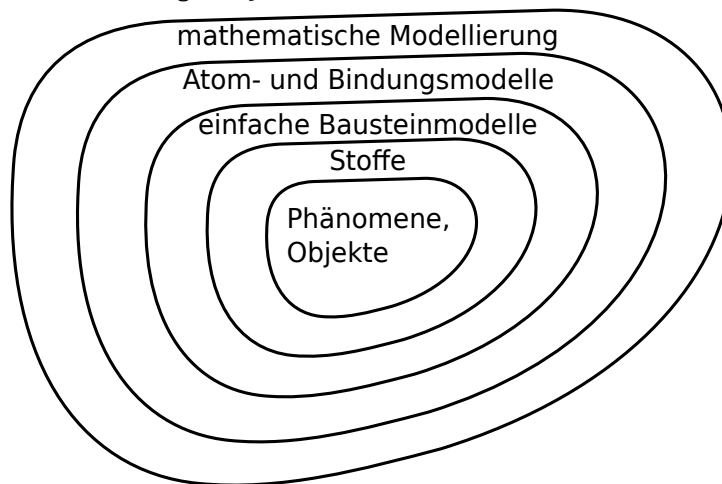
de Boer et al. (2006) betonen in diesem Zusammenhang, dass eine mathematische Verknüpfung der Ebenen erst nach einer getrennten Betrachtung der Inhalte auf beiden Ebenen vorgenommen werden sollte.

Eine etwas andere Verortung der Mathematik innerhalb des Johnstone-Dreiecks nehmen Schanze und Parchmann (2013) vor. Dazu untergliedern sie das Johnstone-Dreieck zunächst in mehrere Zwischenebenen und betrachten die Mathematik als eine dieser Ebenen (siehe Abbildung 1.2).

Eine explizite Zuordnung der Zwischenebenen zu den drei Johnstone-Ebenen wird nicht vorgenommen. Allerdings bezeichnen Schanze und Parchmann (2013) die submikroskopische Ebene als „Ebene der Modelle“ (Schanze & Parchmann, 2013, S. 2) und sehen den Nutzen der Zwischenebenen darin, „die Übergänge von der stofflichen Betrachtung in die verschiedenen *Modellebenen* [Hervorhebung hinzugefügt] bewusst zu machen“ (Schanze & Parchmann, 2013, S. 2–3). Daher scheint die Mathematik als eine dieser Modellebenen aufgefasst und in diesem Fall eher der submikroskopischen Ebene zugeordnet zu werden. Schanze und Parchmann

Abbildung 1.2

Schichtstruktur zur Erweiterung des Johnstone-Dreiecks



Anmerkung. In Anlehnung an Schanze und Parchmann (2013, S. 2).

(2013) weisen jedoch darauf hin, dass mathematische Betrachtungen nicht nur der äußersten Ebene vorbehalten sind, sondern sich auch auf den anderen Zwischenebenen Ansatzpunkte für solche Betrachtungen ergeben, die abstrakte Mathematisierungen vorbereiten können. Beispielsweise können einfache „Je-mehr-desto-Aussagen“ zur Beziehung zwischen Oxoniumionen und pH-Wert einen Zugang zu exakten mathematischen Betrachtungen des pH-Werts vorbereiten (Schanze & Parchmann, 2013).

Nakhleh und Krajcik (1994) betrachten die Mathematik eher als eine zusätzliche, gleichwertige Johnstone-Ebene. So unterscheiden sie neben den drei bekannten Ebenen zusätzlich zwischen einer algebraischen Ebene. Zur symbolischen Ebene werden „equations, diagrams, and molecular structure drawings“ (Nakhleh & Krajcik, 1994, S. 1078) und zur algebraischen Ebene „formulas and graphs“ (Nakhleh & Krajcik, 1994, S. 1078) zugeordnet. Eine trennscharfe Beschreibung der Ebenen ist allerdings nicht möglich, da keine exakte Definition dieser Begriffe angegeben wird. Anhand der konkreten Beispiele zur Säure-Base-Chemie wird allerdings deutlich, dass Nakhleh und Krajcik (1994) insbesondere mathematische Berechnungen zur algebraischen Ebene zuordnen, während sie Graphen zum pH-Wert einer Lösung der symbolischen Ebene zuordnen.

Einen ganz anderen Ansatz verfolgen Reiners und Struwe (2011). Statt die Mathematik innerhalb des Johnstone-Dreiecks zu verorten, verdeutlichen sie die Übertragbarkeit der drei Johnstone-Ebenen auf die Mathematik. Dazu ein kurzes, schulorientiertes Beispiel:

Die Veränderung der Position eines Schattens in Abhängigkeit vom Stand der Sonne stellt ein beobachtbares Phänomen dar und lässt sich somit der makroskopischen Ebene zuordnen. Zur Beschreibung und Erklärung dieses Phänomens werden Begriffe wie „Geraden“, „Vektoren“ und „Ebenen“ benötigt. Diese können der submikroskopischen Ebene zugeordnet werden, da es sich dabei um theoretische Begriffe handelt, die mithilfe von Modellen in Form von beispielsweise Linien oder rechteckigen Flächen veranschaulicht werden. Eine Darstellung auf der Symbolebene in Form von Gleichungen ermöglicht letztendlich eine Berechnung der Position des Schattens.

Dieses Beispiel verdeutlicht nicht nur die Übertragbarkeit der Johnstone-Ebenen auf mathematische Sachverhalte, sondern gleichzeitig auch die Art der Vermittlung von Mathematik in der Schule. Anstatt einer axiomatisch-deduktiven Herangehensweise, die in der Mathematik üblich ist, wird Mathematik in der Schule eher als eine induktiv aufgebaute Wissenschaft vermittelt. Dabei werden – ähnlich wie in der Chemie – Modelle und Symbole eingesetzt, um wahrnehmbare Phänomene zu erklären und zu beschreiben (Reiners & Struwe, 2011).

Insgesamt verdeutlichen die vorgestellten Ansätze, dass viele verschiedene Beziehungen zwischen der Mathematik und dem Johnstone-Dreieck existieren, die jedoch keinesfalls eindeutig sind. Somit kann das Johnstone-Dreieck als ein Bindeglied zwischen der Chemie und Mathematik und damit als eine zentrale theoretische Grundlage für die vorliegende Arbeit betrachtet werden.

1.4 Herausforderungen

Mathematische Begriffe im Chemieunterricht sind für Lernende besonders herausfordernd, wie zahlreiche empirische Untersuchungen etwa zur Stoffmenge (Dahsah & Coll, 2008; Fach et al., 2007; Staver & Lumpe, 1995), zum limitierenden Reaktanten (Chandrasegaran et al., 2009; Gauchon & Méheut, 2007; Huddle & Pillay, 1996),

zum pH-Wert (E.-J. Park & Choi, 2013; Watters & Watters, 2006) oder zu intensiven Größen (Fassouloupoulos et al., 2003; Gennaro, 1981; Wink & Ryan, 2019) belegen. In diesem Unterabschnitt soll es jedoch nicht um spezifische Herausforderungen im Umgang mit einzelnen dieser Begriffe gehen. Vielmehr werden verschiedene Herausforderungsbereiche thematisiert, die sich bei mehreren der Begriffe beobachten lassen. Diese Darstellung erhebt jedoch keinen Anspruch auf eine umfassende, systematische Literaturübersicht. Vielmehr bietet sie einen Überblick über die für die vorliegende Arbeit relevanten Herausforderungsbereiche: die Symbolebene, das konzeptuelle Verständnis und mathematische Grundfertigkeiten. Die Ausführungen basieren auf den Ergebnissen der Masterarbeit des Autors (Meyer, 2021).

Symbolebene Eine Herausforderung, die im Umgang mit mathematischen Begriffen häufig auftritt, ist die Interpretation von Darstellungsmitteln der Symbolebene. Sowohl in der Chemie als auch in der Mathematik fungieren diese als „Standarddarstellungsmittel, die es erlauben, gewisse Sachverhalte ... der intendierten Anwendungen und der theoretischen Begriffe qualitativ und quantitativ bzw. griffig und hinreichend präzise zu beschreiben“ (Reiners & Struwe, 2011, S. 38).

Die Regeln für die Codierung und Decodierung der chemischen Symbolsprache vergleichen Parchmann und Bernholt (2013) mit grammatikalischen Regelwerken. Eine mangelnde Kenntnis dieser Regeln kann in Zusammenhang mit Verbalisierungen schnell zu falschen Erkenntnissen führen: „H₂O“ wird als „H zwei O“ ausgesprochen und suggeriert damit fälschlicherweise, dass ein Wassermolekül „ein H“ und „zwei O“ enthält (Parchmann & Bernholt, 2013). Ähnliches gilt auch für die mathematische Symbolsprache. Sollen Aussagen der Form „ x Mal so viel von A wie von B “ mathematisiert werden, geben Lernende häufig die Gleichung „ $xA = B$ “ statt „ $A = xB$ “ an (Dierks et al., 1985; Niaz, 1989). Beide Beispiele verdeutlichen, dass die Alltagssprache bei der Interpretation mathematischer und chemischer Symbole hinderlich sein kann. Eine weitere Hürde liegt in der unterschiedlichen „Grammatik“ der beiden Symbolsprachen, wie zwei Beispiele von Köhler (1992) verdeutlichen: „H₂“ liest sich chemisch als „ $2 \cdot \text{H}$ “, während es mathematisch „das zweite Wasserstoffatom“ bedeutet. Weiterhin lässt sich „ xy “ mathematisch als „ $x \cdot y$ “ interpretieren, während es chemisch vielmehr „ $x + y$ “ oder „ $x \cup y$ “ ausdrückt.

In einer Reihe an empirischen Untersuchungen zeigen Lernende Schwierigkeiten, die im Zusammenhang mit der Symbolsprache stehen. Für einen Überblick darüber sei auf das umfassende Review von Taskin und Bernholt (2014) verwiesen. Da in dem Review allerdings keine Untersuchungen im Zusammenhang mit mathematischen Begriffen berücksichtigt wurden, sollen im Folgenden einige vorgestellt werden. Teilweise lassen sich die Ergebnisse der Untersuchungen jedoch auf die Befunde des Reviews zurückführen.

Beispielsweise berechnete 64 % von 485 Lernenden in einer Untersuchung von Shadreck und Ochonogor (2017) bei der Frage nach der in 1,6 g Backsoda (NaHCO_3) enthaltenen Anzahl an Sauerstoffatomen, die entsprechende Anzahl an Sauerstoffmolekülen. Ein Erklärungsansatz liefert der im Review (Taskin & Bernholt, 2014) beschriebene Befund, dass Lernende häufig an der Idee „chemische Formel als Abkürzung“ statt an der Idee „chemische Formel als Angabe der Zusammensetzung der jeweiligen Substanz“ festhalten und demnach mit dem Wort „Sauerstoff“ die Formel „ O_2 “ assoziierten. Als Ursache für das Festhalten an dieser Idee wird der gebräuchliche Übergang von Wort- zu Symbolgleichungen im Chemieunterricht gesehen (Taskin & Bernholt, 2014).

Die gleichen Verständnisschwierigkeiten konnten bei einigen Erstsemesterstudierenden in einer Untersuchung von Ralph und Lewis (2019) beobachtet werden. Als Grund dafür wird dort allerdings die unpräzise Formulierung der Aufgabenstellung gesehen, in der nach der in 15 g K_2SO_4 enthaltenen Stoffmenge von Sauerstoff statt von Sauerstoffatomen gefragt wurde. Solche fachsprachlichen Ungenauigkeiten und Vermischungen der Johnstone-Ebenen lassen sich ebenfalls in Unterrichtsgesprächen beobachten Abels et al. (2018) und werden häufig als Ursache für die Verständnisschwierigkeiten bei der Interpretation chemischer Symbole gesehen (Bake & Wloka, 2015).

Fach et al. (2007) konnten Schwierigkeiten im Umgang mit Reaktionsgleichungen beobachten. Als ein großes Problem hat sich dort das Aufstellen der Stoffmengenverhältnisse beteiligter Reaktionspartner erwiesen. Entweder berücksichtigten die Lernenden die Stoffmengenverhältnisse in ihren Berechnungen nicht oder sie wussten nicht, dass die Verhältnisse aus der Reaktionsgleichung entnommen werden können. Weiterhin waren einige der Meinung, es müsse die Summe der Stoffmengen auf beiden Seiten der Reaktionsgleichung identisch sein.

Besonders herausfordernd für Lernende ist das Erfassen der submikroskopischen Bedeutung von Formeln und Reaktionsgleichungen (siehe Taskin & Bernholt, 2014). So konnten beispielsweise in den Untersuchungen von Nurrenbern und Pickering (1987) und Sanger (2005) nur wenige Lernende submikroskopischen Darstellung einer Reaktion die korrekte Reaktionsgleichung zuordnen. Stattdessen wurden überschüssige Reaktanten mit in die Reaktionsgleichung aufgenommen, Indizes und stöchiometrische Faktoren miteinander vertauscht oder Reaktantenverhältnis nicht berücksichtigt.

Konzeptuelles Verständnis Anfängliche Untersuchungen zu mathematischen Begriffen im Chemieunterricht fokussierten sich ausschließlich auf die Bearbeitung quantitativer, algebraisch lösbarer Probleme, da viele Chemielehrende annahmen, ein erfolgreicher Umgang mit diesen Problemen würde auf ein konzeptuelles Verständnis der Begriffe hinweisen (Bodner & Herron, 2002; Salta & Tzougraki, 2011). Vor etwa 30 Jahren wurden allerdings erste Untersuchungen veröffentlicht, die sich mit der Frage nach der Angemessenheit dieser Annahme beschäftigten. Dazu wurden neben den traditionellen, quantitativen Problemen auch solche integriert, die beispielsweise durch das Einfordern von Begründungen, Vorhersagen oder Erklärungen auf die Erhebung des konzeptuellen Verständnisses von Lernenden abzielen. Diese werden als *konzeptuelle* Probleme bezeichnet, während die algebraisch lösbaren Probleme als *algorithmische* Probleme bezeichnet werden.

Eine der ersten Studien wurde von Nurrenbern und Pickering (1987) durchgeführt, in welcher Studierende sowohl algorithmische, als auch konzeptuelle Probleme zu den Themen *Stöchiometrie* und *ideales Gasgesetz* lösen sollten. Die konzeptuellen Probleme wurden mithilfe von Partikelzeichnungen formuliert, während es sich bei den algorithmischen Problemen um typische Rechenaufgaben handelte. Ein gleiches Design, aber mit zusätzlichen Begriffen (u. a. Dichte), verwendete Nakhleh (1993) in ihrer Untersuchung. Die Ergebnisse beider und vieler weiterer Studien (BouJaoude et al., 2004; Nakhleh & Mitchell, 1993; Papaphotis & Tsapalis, 2008; Salta & Tzougraki, 2011) zeigten, dass Studierende die algorithmischen Probleme signifikant besser lösen konnten als die entsprechenden konzeptuellen Probleme. Dies weist sowohl auf die Unangemessenheit der Annahme der Chemielehrenden als auch auf ein mangelndes konzeptuelles Verständnis der Begriffe bei Lernenden hin.

Ein mangelndes konzeptuelles Verständnis zeigt sich jedoch nicht nur in den geringen Lösungshäufigkeiten konzeptueller Probleme, sondern spiegelt sich auch in den zahlreichen alternativen Vorstellungen wider, die Lernende zu Begriffen wie etwa der Dichte (Grüß-Niehaus & Schanze, 2010; Lichtfeldt & Peuckert, 1997), der Stoffmenge (Dahsah & Coll, 2008; Fach et al., 2007; Staver & Lumpe, 1995), dem limitierenden Reaktanten (Huddle & Pillay, 1996) oder dem chemischen Gleichgewicht (Camacho & Good, 1989; Gorodetsky & Gussarsky, 1986; Huddle & Pillay, 1996) entwickelt haben.

Darüber hinaus scheint neben einem mangelnden konzeptuellen Verständnis auch das Vorgehen von Lernenden bei der Bearbeitung von Problemen mathematisch-chemischer Begriffe zu Schwierigkeiten zu führen. So tendieren Lernende häufig dazu, die Probleme mithilfe algorithmischer Verfahren zu lösen (Cracolice et al., 2008; Schmidt & Jignéus, 2003; Staver & Lumpe, 1995). Dadurch sind Lernende mehr oder weniger erfolgreich im Umgang mit Standardproblemen aus Textbüchern, jedoch haben sie Schwierigkeiten bei komplexeren oder neuen Problemen (BouJaoude & Barakat, 2000). Nach Staver und Lumpe (1995) zählt das Verwenden auswendig gelernter, algorithmischer Verfahren zu einer der Hauptbarrieren des erfolgreichen Problemlösens. Dabei scheint nicht das Nutzen von Algorithmen per se, sondern vielmehr die fehlende Integration chemischer Kenntnisse problematisch zu sein (Gulacar et al., 2013; Heyworth, 1999).

Mathematische Grundfertigkeiten Im Zusammenhang mit mathematischen Begriffen im Chemieunterricht werden eine Reihe an mathematischen Grundfertigkeiten benötigt. Dazu gehört unter anderem der Umgang mit Klammern, negativen Zahlen, Brüchen, Dezimalzahlen, Exponenten, Verhältnissen, Prozentsen, Gleichungen, Graphen und Logarithmen (Denny, 1971; Leopold & Edgar, 2008; Schanze & Parchmann, 2013). In einer Befragung von zwölf Lehrkräften von Manthey und Gröger (2017) wurden insbesondere Verhältnisrechnungen, Logarithmen, das Umstellen von Gleichungen sowie das Verwenden und Umrechnen von Einheiten als besonders problematisch bei Lernenden angesehen.

Konkret auftretende Schwierigkeiten konnten Leopold und Edgar (2008) in einer Untersuchung mit 360 Chemiestudierenden bei der Bearbeitung grundlegender Aufgaben zu den Bereichen Logarithmus, Zehnerpotenzen, Graphen und Algebra

beobachten. Die meisten Schwierigkeiten traten im Zusammenhang mit Logarithmen auf. Zwar zeigte sich der Großteil der Studierenden vertraut im Umgang mit Logarithmusgesetzen, eine korrekte Lösung für $\log_{10}(100)$ konnte jedoch lediglich die Hälfte angeben. Darüber hinaus schienen die Studierenden Schwierigkeiten bei der direkten Interpretation von Zehnerpotenzen zu haben, da viele bei Rechenaufgaben die Zahlen zunächst in die gewohnte Schreibweise ohne Zehnerpotenzen überführten. Im Bereich Algebra zeigten sich Schwierigkeiten beim Vereinfachen von Termen mit Brüchen und bei den Aufgaben zu Graphen konnte ein Großteil der Studierenden die passenden Funktionsterme zu den Graphen nicht angeben.

Ein übliches Vorgehen bei Untersuchungen zu mathematischen Grundfähigkeiten in der Chemie ist ein Vergleich zwischen mathematischen Aufgaben im chemischen Kontext und analogen Aufgaben in nicht-chemischen Kontexten (Höner, 1996; Scott, 2012; Ver Beek & Louters, 1991; Wink & Ryan, 2019). Dies soll Aufschluss darüber geben, inwiefern sich die Schwierigkeiten auf die Mathematik oder die Chemie zurückführen lassen. Insgesamt wurden in den Untersuchungen geringere Leistungen bei der Bearbeitung chemischer Aufgaben festgestellt (Höner, 1996), zumindest bei zunehmender Komplexität der Aufgaben (Scott, 2012; Ver Beek & Louters, 1991).

Beispielsweise schnitten die Lernenden in der Untersuchung von Scott (2012) bei komplexen Aufgaben (mehrere Rechenschritte) im mathematischen Bereich deutlich besser ab, als im chemischen Kontext, während bei den leichteren Aufgaben kein signifikanter Leistungsunterschied beobachtet werden konnte. Scott (2012) führt dies auf mehr Übung und Erfahrungen der Lernenden im Umgang mit mathematischen Aufgaben zurück. Dies sieht er darin bestätigt, dass bei den chemischen Aufgaben eine Vielfalt an Lösungsstrategien verwendet wurde, während die Lernenden die mathematischen Aufgaben auf eine einzige, algorithmische Art und Weise lösten. Demnach scheint die zugrunde liegende Mathematik der Aufgaben zwar algorithmisch, jedoch nicht konzeptuell verstanden worden zu sein, wodurch die Lernenden Schwierigkeiten bei der Anwendung der Mathematik im chemischen Kontext zeigten (Scott, 2012).

Eine ähnliche Zunahme des Leistungsunterschieds zwischen mathematischen und chemischen Aufgaben in Abhängigkeit von der Komplexität beobachteten Ver Beek und Louters (1991) bei Erstsemesterstudierenden. Im Gegensatz zu Scott (2012)

wird dies allerdings nicht auf ein algorithmisches Verständnis der Mathematik, sondern auf Schwierigkeiten im Umgang mit chemischen Begriffen zurückgeführt.

Dass neben chemischen und mathematischen Aspekten ebenfalls die Problematik des Wissenstransfers als Ursache für Schwierigkeiten bei der Anwendung mathematischer Grundfertigkeiten in Betracht gezogen werden sollte, deutet die Untersuchung von Menis (1987) an. Dort lösten nahezu alle 85 Lernende mathematische Aufgaben zu Verhältnissen und zur Isolation von Variablen korrekt, während nur annähernd die Hälfte die chemischen Analoga richtig bearbeitete. Da allerdings zuvor in einem Test mit thematisch gleichen, rein chemischen Aufgaben hohe Durchschnittsleistungen erzielt wurden, können mangelnde Chemiekenntnisse als Ursache weitestgehend ausgeschlossen werden. Demnach scheinen die Schwierigkeiten im Bereich des Wissenstransfers zu liegen (Menis, 1987).

Zusammenfassung Insgesamt wurde ein Einblick in verschiedene Herausforderungsbereiche gegeben, die im Umgang mit mathematischen Begriffen im Chemieunterricht auftreten können.

Zunächst wurden Herausforderungen im Zusammenhang mit Darstellungen der Symbolebene präsentiert. Als mögliche Ursachen wurden dabei unter anderem Einflüsse der Alltagssprache und Bezüge zur mathematischen Symbolsprache, das Vermischen von Johnstone-Ebenen sowie ein mangelndes Verständnis der submikroskopischen Bedeutung der Symbole thematisiert.

Darüber hinaus hat sich das mangelnde konzeptuelle Verständnis mathematisch-chemischer Begriffe bei Lernenden als eine weitere Herausforderung herausgestellt. Dies zeigte sich sowohl in den geringen Lösungshäufigkeiten konzeptueller Probleme, als auch in der Vielzahl an alternativen Vorstellungen zu den Begriffen. Zudem konnte häufig ein algorithmisches Vorgehen beim Lösen von Problemen im Zusammenhang mit einer fehlenden Integration chemischer Kenntnisse beobachtet werden. Dies führt dazu, Lernende zwar häufig Routineaufgaben lösen können, aber bei komplexeren oder konzeptuellen Problemen scheitern.

Zuletzt wurde darauf eingegangen, dass auch die Mathematik selbst eine Herausforderung für Lernende sein kann, wie sich unter anderem im Umgang mit Logarithmen, Zehnerpotenzen und Graphen gezeigt hat. Insgesamt konnte jedoch in mehreren Studien beobachtet werden, dass Lernende mathematische Aufgaben in

einem chemischen weniger gut lösen konnten, als in einem nicht-chemischen Kontext, insbesondere wenn die Komplexität der Aufgaben zunahm. Als mögliche Gründe wurden Transferschwierigkeiten, mangelndes Verständnis der zugrundeliegenden Chemie sowie mehr Übung und Erfahrung im Umgang mit mathematischen Aufgaben thematisiert.

1.5 Bestehende Ansätze zur Begegnung der Herausforderungen

In der Literatur lassen sich bereits einige Ansätze zur Begegnung der im vorherigen Unterabschnitt vorgestellten Schwierigkeiten im Umgang mit mathematisch-chemischen Begriffen finden. Diese sollen im Folgenden näher vorgestellt werden. Auch diese Zusammenstellung an Ansätzen beruht auf den Erkenntnissen aus der Masterarbeit des Autors (Meyer, 2021) und erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Es werden die folgenden Ansätze vorgestellt: Veranschaulichungen, Aufgabenformate und -unterstützungen, methodische Ansätze und Unterrichtskonzepte.

Veranschaulichungen Einige der in der Literatur beschriebenen Ansätze zielen darauf ab, den Lernenden die abstrakten mathematisch-chemischen Zusammenhänge mithilfe verschiedener Hilfsmittel zu veranschaulichen.

Eines dieser Hilfsmittel können Graphen sein. So können Graphen nicht nur zu Verständnisschwierigkeiten führen, sondern ebenso Verständnis fördern, wenn Lernende den Umgang mit diesen verinnerlicht haben. Dies wird als *Repräsentationsdilemma* bezeichnet und gilt für jegliche Art von Darstellungen (Rau, 2017). Ein Beispiel für den Einsatz von Graphen zur Verständnisförderung ist die Verwendung von Stoffmengendiagrammen, in denen die Stoffmenge der an einer Reaktion beteiligten Stoffe in Abhängigkeit von der Umsatzvariablen aufgetragen wird. Die dabei entstehenden Geraden können dann zur Veranschaulichung von Reaktionsgleichungen (Loeck, 1994) oder dem limitierenden Reaktanten (Sostarecz & Sostarecz, 2012) dienen. Alternativ können Graphen auch zur Lösung quantitativer Probleme verwendet werden, wie die von Pergantis et al. (2019) entwickelten *Pufferquadrate* zur Lösung typischer Aufgaben zu Puffersystemen verdeutlichen.

Ein weiteres Hilfsmittel zur Veranschaulichung, das ebenfalls zu Verständnisschwierigkeiten führen kann, sind Teilchendarstellungen. Diese können das konzeptuelle Verständnis von Reaktionsgleichungen fördern (Sanger, 2005). Damit das gelingen kann, sollten Lernende die Darstellungen interpretieren, selbst konstruieren, sowie zu entsprechenden Symbolgleichungen zuordnen. Insbesondere durch Letzteres werden die Unterschiede zwischen Teilchendarstellung und Reaktionsgleichung hervorgehoben, wodurch Lernende die in Symbolgleichungen implizit enthaltenen Informationen erfassen können. Alle drei der zuvor genannten Aktionen realisierten Davidowitz et al. (2010) in einem Unterrichtsansatz zum Lehren von Reaktionsgleichungen. Dieser erwies sich im Rahmen einer Untersuchung mit Studierenden als wirksam hinsichtlich der Bearbeitung stöchiometrischer Aufgaben.

Darüber hinaus können auch Analogien zur Veranschaulichung dienen. Analogien sind teilweise Übereinstimmungen zwischen Begriffen oder Zusammenhängen, die ansonsten verschieden sind (Thiele & Treagust, 1991). Sie können sowohl das Erschließen theoretischer Begriffe, als auch das Lösen neuer Problemstellungen erleichtern (Aßmus, 2013). In der Literatur lassen sich demnach viele Analogien im Zusammenhang mit mathematischen Begriffen im Chemieunterricht finden. Dazu gehören beispielsweise (a) Backrezepte zur Veranschaulichung stöchiometrischer Berechnungen (Umland, 1984), (b) das Zerlegen von Brillen in Gestelle und Gläser zur Verdeutlichung der Stückzahländerungen bei chemischen Reaktionen (Sauer mann & Barke, 2003), (c) ein Tanzball zur Veranschaulichung des chemischen Gleichgewichts (Sumfleth & Kleine, 1999) sowie (d) das Zählen und Wiegen von Bonbons zur Übertragung dieses Prinzips auf das Molkonzept (Barke & Indriyanti, 2017). Der Einsatz von Analogien zur Verständnisförderung erwies sich in mehreren Untersuchungen als wirksam, insbesondere für Lernende mit geringem Vorwissen (Sumfleth & Kleine, 1999), geringem Abstraktionsvermögen (Gabel & Sherwood, 1980) sowie Angst vor Mathematik und mangelnden Fähigkeiten im proportionalen Denken (Gabel & Sherwood, 1983).

Aufgabenformate und -unterstützungen Analog zur Mathematik finden mathematische Betrachtungen in der Chemie häufig anhand von Aufgaben statt (Stäudel & Tepner, 2013). Diese können nicht nur zur Übung oder Vertiefung, sondern ebenfalls zur selbstständigen Erarbeitung neuer Fachinhalte eingesetzt werden und

somit zum besseren Verständnis dieser Inhalte beitragen (Stäudel & Tepner, 2013). Demnach lassen sich in der Literatur entsprechend viele Ansätze finden, die sich mit der Optimierung von Aufgaben oder Entwicklung von Unterstützungsmaßnahmen beschäftigen.

Eine Möglichkeit der Optimierung ist die Einbettung von Aufgaben in einen geeigneten Kontext. Dies kann einerseits den Wissenstransfer fördern und andererseits das Interesse und die Motivation von Lernenden steigern. Letzteres führt möglicherweise zu einer intensiveren Auseinandersetzung mit den Aufgaben und so einem vertieften Verständnis der Inhalte (Kölbach & Sumfleth, 2013).

Die gewählten Kontexte sollten relevant für die Gesellschaft oder die Lebenswelt der Lernenden sein, damit die Aufgaben authentisch wirken und die Lernenden die Inhalte besser nachvollziehen können (Franke-Braun et al., 2008). Zudem sollten die Berechnungen einen Bezug zum jeweiligen Kontext aufweisen, damit Mathematisierungen veranschaulicht werden und Sinn ergeben (Marohn, 2013). Beispiele für solche Aufgaben finden sich bei Treptow (2010) sowie Borrows et al. (1998).

In diesem Zusammenhang sind auch Modellierungsaufgaben zu erwähnen, die das Lösen authentischer Probleme in der Realität umfassen. Modellierungsaufgaben sind im Mathematikunterricht aufgrund der Verankerung in den Lehrplänen aller Bundesländer ein fester Bestandteil und spielen gleichzeitig eine zentrale Rolle in der mathematikdidaktischen Forschung (Goldhausen & Di Fuccia, 2021). Auch im chemischen Bereich wird Modellierungsaufgaben ein großer Nutzen hinsichtlich der Förderung eines vertieften Verständnisses chemischer Inhalte zugeschrieben und es existieren bereits einige Aufgabenvorschläge (z. B. Beck et al., 2010; Goldhausen & Di Fuccia, 2021; Stäudel, 2012).

Eine erhebliche Anzahl an Ansätzen zur Begegnung von Schwierigkeiten im Umgang mit mathematisch-chemischen Begriffen fokussiert sich auf allgemeine Lösungsschemata und -verfahren. Diese sollen die Bearbeitung typischer Rechenaufgaben für Lernende systematisieren und vereinfachen. Ein Beispiel dafür ist die *Bridge Method* von Gizara (1981). Bei dieser wird den Lernenden eine Art Karte zur Verfügung gestellt, mit deren Hilfe sich die notwendigen Rechenschritte zur Lösung stöchiometrischer Aufgaben bestimmen lassen. Es lassen sich viele weitere solcher Beispiele finden, die Berechnungen zur Stöchiometrie (Ault, 2001; Koch, 1995; Krieger, 1997; Wagner, 2001), zur Titration (Lim, 2012; Waddling, 1983)

oder zur Säure-Base-Chemie (Cepriá & Salvatella, 2014; Felty, 1978) systematisieren und vereinfachen sollen. Dies soll insbesondere jüngere Lernende bei der Strukturierung von Problemen unterstützen (Fach et al., 2007). Allerdings könnten solche Verfahren zu einem algorithmischen Lösen von Problemen verleiten, das in Anbetracht der in Abschnitt 1.4 dargelegten Schwierigkeiten in Verbindung mit algorithmischem Problemlösen als kritisch zu bewerten ist.

Methodische Ansätze In der Literatur lassen sich auch einige methodische Ansätze zur Begegnung von Schwierigkeiten im Umgang mit mathematisch-chemischen Begriffen finden.

Einer dieser Ansätze ist die experimentelle Herleitung quantitativer Zusammenhänge, der zu einem besseren Verstehen der Zusammenhänge beitragen soll. Beispiele für diesen Ansatz sind die experimentelle Herleitung der Bedeutung von Summenformeln (Matuschek, 1994; Pfangert-Becker, 2013) oder stöchiometrischen Koeffizienten (De Lima et al., 2014).

Ein weiterer Ansatz ist die Erarbeitung mathematisch-chemischer Begriffe auf den drei Johnstone-Ebenen, wodurch das konzeptuelle Verständnis dieser Begriffe gefördert werden soll. Ein Beispiel dafür ist die Unterrichtseinheit von González-Sánchez et al. (2014) zum limitierenden Reaktanten. Dort ermitteln die Lernenden den limitierenden Reaktanten zunächst auf makroskopischer Ebene, indem sie Kupfersulfatlösung mit Natronlauge in verschiedenen Mengenverhältnissen miteinander reagieren lassen und anschließend die überschüssige Lösung erneut mit jeweils einem der Reaktanten versetzen. Auf submikroskopischer Ebene wird der limitierende Reaktant durch das Formen von möglichst viel Produkt mithilfe von Knetkugeln als Modell für die reagierenden Teilchen bestimmt. Erst im letzten Schritt werden die gewonnen Erkenntnisse mithilfe von Berechnungen auf der Symbolebene verifiziert.

Hitt (2005) entwickelte eine Unterrichtseinheit zur Dichte in welcher die Lernenden (a) auf makroskopischer Ebene das Schwimmen und Sinken von Getränkedosen mithilfe der Dichte erklären, (b) auf submikroskopischer Ebene die Dichte von Metall mithilfe eines Graphen bestimmen und (c) auf symbolischer Ebene die Dichte unbekannter Flüssigkeiten mithilfe der Formel der Dichte berechnen. Das Verständnis der submikroskopischen Ebene von Hitt (2005) unterscheidet sich somit

von dem der vorliegenden Arbeit, nach dem Graphen der symbolischen Ebene zugeordnet werden.

Barke und Indriyanti (2017) verwenden ebenfalls das Johnstone-Dreieck, um Lernenden das Molkonzept näher zu bringen. Dazu wiegen die Lernenden zunächst Holzkohlestücke ab (makroskopisch), betrachten die Graphitstruktur anhand eines Modells (submikroskopisch) und berechnen die Anzahl der Kohlenstoffatome in der jeweiligen Stoffportion (symbolisch).

Im Zusammenhang mit methodischen Ansätzen sind auch mehrere digitale Lernumgebungen zu erwähnen, die verschiedene Methoden integrieren und zum Verständnis mathematischer Betrachtungen im Chemieunterricht beitragen sollen (z. B. Dori & Hameiri, 1998; Kappenberg, 2013; Lou & Jaeggi, 2020; Wäß et al., 2013). Beispielsweise entwickelten Dori und Hameiri (1998) eine digitale Lernumgebung, die sich aus mehreren stöchiometrischen Aufgaben im Multiple-Choice-Format zusammensetzt. Diese werden den Lernenden jeweils einzeln und mit steigendem Schwierigkeitsgrad präsentiert. Zudem stehen Hilfestellungen zur Verfügung und die Lernenden erhalten bei falschen Antworten Feedback und Erklärungen.

Im Gegensatz dazu entwickelten Wäß et al. (2013) eine Lernumgebung zur Erarbeitung der chemischen Formelsprache und dem Molkonzept. Diese setzt sich aus mehreren Modulen zusammen und ist nach dem Prinzip des selbstgesteuerten Lernens gestaltet. In den einzelnen Modulen kommen verschiedene methodische Mittel wie etwa Aufgaben, Versuchsanleitungen, Filmausschnitte, Animationen oder gestufte Lernhilfen zum Einsatz.

Unterrichtskonzepte Konkrete Unterrichtskonzepte zur Vermittlung mathematischer Begriffe im Chemieunterricht lassen sich kaum finden. Zudem beklagen mehrere Lehrkräfte das Fehlen solcher Unterrichtskonzepte (Fiebig & Melle, 2001; Goldhausen & Di Fuccia, 2015). Die zwei in der Literatur beschriebenen Unterrichtskonzepte sollen im Folgenden vorgestellt werden.

Fach, Endres et al. (2006) orientierten sich an der bekannten Unterrichtskonzeption Chemie im Kontext und entwickelten anhand dessen eine konkrete Unterrichtseinheit zu quantitativen Betrachtungen im Chemieunterricht für die 8. Jahrgangsstufe. Analog zu Chemie im Kontext gliedert sich die Unterrichtseinheit in vier Phasen:

In der Begegnungsphase werden den Lernenden mehrere Aufgaben vorgestellt, die die Fragestellung „Welche Masse muss ich von meinem Ausgangsstoff einsetzen, um eine bestimmte Masse an Produkt zu bekommen bzw. eines anderen Eduktes umzusetzen?“ in verschiedenen Kontexten thematisieren. In der darauf folgenden Neugier- und Planungsphase entwickeln die Lernenden verschiedene Lösungsvorschläge, die sie im Plenum präsentieren und diskutieren. Unter der Leitung der Lehrkraft wird anschließend ein Vorschlag ausgewählt, dem in der Erarbeitungsphase nachgegangen wird. Hierzu werden in einem Lernzirkel Aufgaben mit gestuften Lernhilfen zusammengestellt, die dann in Kleingruppen bearbeitet werden. Nach Abschluss des Lernzirkels sind die Lernenden in der Lage, die Kontextaufgaben aus der anfänglichen Begegnungsphase zu lösen. In der abschließenden Vertiefungsphase sollen die Lösungen auf einem Poster präsentiert werden. Zudem bearbeiten die Lernenden weitere Übungsaufgaben und entwickeln ein Schema zur Lösung stöchiometrischer Aufgaben.

Schmidkunz (1992) orientierte sich hingegen an dem unter anderem von ihm entwickelten Forschend-entwickelnden Unterrichtsverfahren. Nach diesem entwickelte er zwei Unterrichtseinheiten zur Vermittlung quantitativer Betrachtungen im Chemieunterricht nach dem Prinzip „Erst qualitativ, dann quantitativ“. Dazu gehen die Lernenden in der ersten Unterrichtseinheit der Problemfrage nach, wie die Wirkungsweise der Oberflächenspannung charakterisiert und demonstriert werden kann und betrachten die Tropfengröße als mögliche Lösung. In einem Experiment lassen die Lernenden gleiche Volumina von Flüssigkeiten mit unterschiedlicher Oberflächenspannung (z. B. Wasser und Aceton) aus einer Bürette tropfen. Dabei entstehen beim Wasser größere und weniger Tropfen als beim Aceton, wodurch qualitative Zusammenhänge zwischen Tropfengröße, Tropfenzahl und Oberflächenspannung hergeleitet werden können. In der zweiten Unterrichtseinheit werden diese quantitativ bestätigt, indem zunächst die Formel für die Oberflächenspannung mathematisch hergeleitet und anschließend die Oberflächenspannung von Wasser und Aceton berechnet wird.

Zusammenfassung In diesem Abschnitt wurde ein Überblick über die verschiedenen Ansätze zur Begegnung von Schwierigkeiten im Umgang mit mathematischen Begriffen im Chemieunterricht gegeben.

Einige dieser Ansätze zielen darauf ab, abstrakte mathematisch-chemische Zusammenhänge mithilfe von Graphen, Partikelzeichnungen oder Analogien zu veranschaulichen.

Darüber hinaus gibt es einige Ansätze, die Aufgabenstellungen zu mathematisch-chemischen Begriffen mithilfe von Kontextualisierungen und authentischen Problemen optimieren, um so das Verstehen dieser Begriffe zu fördern.

Ein besonders großer Anteil an Ansätzen fokussiert sich auf die Unterstützung von Lernenden bei der Bearbeitung mathematisch-chemischer Aufgaben durch vereinfachende und systematisierende Lösungsschemata. Dies könnte jedoch zu einem algorithmischen Problemlösen verleiten und ist daher kritisch zu betrachten.

Weiterhin wurden einige methodische Ansätze präsentiert, wie das experimentelle Herleiten quantitativer Zusammenhänge oder das Betrachten mathematisch-chemischer Begriffe auf den drei Johnstone-Ebenen. In diesem Zusammenhang wurden auch digitale Lernumgebungen vorgestellt, die methodische Hilfsmittel wie etwa Feedback, Animationen und gestufte Lernhilfen integrierten.

Zuletzt wurde auf ein Mangel an Unterrichtskonzepten zur Vermittlung mathematisch-chemischer Begriffe hingewiesen, der auch von Lehrkräften beklagt wird. Die zwei vorgestellten Unterrichtskonzepte integrierten mathematische Betrachtungen in die bereits bestehenden Unterrichtskonzepte Chemie im Kontext und das Forschend-entwickelnde Unterrichtsverfahren. Mathematikdidaktische Ansätze schienen dabei nicht berücksichtigt worden zu sein.

2 Das Grundvorstellungskonzept

Welche adäquaten Vorstellungen sollen Lernende zu mathematischen Begriffen ausbilden? Diese Frage beschäftigt die Mathematikdidaktik bereits seit mehreren hundert Jahren. Antworten darauf liefern namhafte Persönlichkeiten wie Piaget, Pestalozzi und Wittmann. Dabei verwenden Sie Begriffe wie zum Beispiel „Verinnerlichungen“, „Anschauungen“ oder „Vorstellungen“, um ihre Standpunkte zu verdeutlichen (vom Hofe, 1996a).

Einige Jahre später hat sich vom Hofe (1995) der historischen Genese dieser Begriffe angenommen und mittels sorgfältiger Analyse Gemeinsamkeiten und Unterschiede herausgearbeitet. Dabei kommt er zu dem Schluss, dass die Begriffe zwar auf psychologischer Ebene teils konträr zueinander sind, jedoch auf didaktischer Ebene ein einheitliches Konzept ergeben: das *Grundvorstellungskonzept*. Kern dieses Konzepts sind die *Grundvorstellungen*.

Grundvorstellungen beschreiben Beziehungen zwischen mathematischen Inhalten und dem Phänomen der individuellen Begriffsbildung. Sie charakterisieren insbesondere drei Aspekte dieses Phänomens:

- *Sinnkonstituierung* eines Begriffs durch Anknüpfung an bekannte Sach- oder Handlungszusammenhänge,
- Aufbau *psychologischer Repräsentationen* bzw. „Verinnerlichungen“, die operatives Handeln auf der Vorstellungsebene ermöglichen,
- Fähigkeit zur *Anwendung* eines Begriffs auf die Wirklichkeit durch Erkennen der entsprechenden Struktur in Sachzusammenhängen oder durch Modellieren des Sachproblems mit Hilfe der mathematischen Struktur. (vom Hofe, 1996a, S. 6) [Hervorhebungen im Original fett statt kursiv].

Grundvorstellungen bezeichnen demnach Deutungsmöglichkeiten mathematischer Begriffe in realen Situationen. Sie vermitteln „zwischen der Welt der Mathematik und der individuellen Begriffswelt des Lernenden“ (vom Hofe, 1995, S. 98) und können somit als Bindeglied zwischen individuellen und konventionellen Begriffen (siehe Abschnitt 1.1) betrachtet werden (Rembowski, 2015).

Diese Definition lässt sich durchaus für ihre Vagheit kritisieren, deren Ursache darin begründet liegt, dass die Grundvorstellungsidee den gemeinsamen Kern vieler verschiedener didaktischer Konzepte vereint und dementsprechend nur sehr allgemein formuliert sein kann (Rembowski, 2015). Trotz der vagen Formulierung hat das Grundvorstellungskonzept seit der Begriffsgrundlegung von vom Hofe (1995) enormen Anklang erfahren, sodass sich über die Jahre hinweg ein breiter Fundus an formulierten Grundvorstellungen zu verschiedensten mathematischen Begriffen entwickelt hat. Die Grundvorstellungen werden beispielsweise in der mathematikdidaktischen Forschung zur Erklärung von Leistungsunterschieden von Lernenden genutzt oder sie dienen als didaktische Leitlinie für den Mathematikunterricht in Lehrplänen und Schulbüchern (Salle & Clüver, 2021).

Um ein besseres Verständnis für das Grundvorstellungskonzept und dessen Verwendung in der Mathematikdidaktik zu erlangen, werden im Folgenden zunächst ausgewählte Beispiele vorgestellt (siehe Abschnitt 2.1), anhand derer zentrale Merkmale und Besonderheiten von Grundvorstellungen herausgearbeitet werden (siehe Abschnitt 2.2). Ergänzend dazu wird ein kurzer Ausblick auf ähnliche Ansätze in der Chemiedidaktik gegeben (siehe Abschnitt 2.3).

2.1 Beispiele zu Grundvorstellungen

Division In den Anfängen entwickelte sich das Grundvorstellungskonzepts vor allem im Bereich des Rechnens der Volksschule. Daher wurden die ersten Grundvorstellungen auch zu Zahlen, Größen und arithmetischen Grundrechenarten formuliert (vom Hofe, 1995).

Für die Division werden in der Literatur zwei Grundvorstellungen unterschieden (Schulz & Wartha, 2021; Wartha & Forcher, 2021; Weber, 2016). Diese werden besonders deutlich, wenn die Strategien zur Lösung einer Divisionsaufgabe betrach-

tet werden. Soll beispielsweise die Divisionsaufgabe „ $12 : 4$ “ gelöst werden, sind folgende Lösungswege denkbar:

1. Zum einen kann die Aufgabe durch gerechtes bzw. gleichmäßige Verteilen gelöst werden, wenn beispielsweise 12 Bonbons gleichmäßig auf vier Teller verteilt werden sollen. Die Frage lautet dann: „Wie viele Bonbons bekommt jeder Teller?“. Eine Antwort auf diese Frage kann entweder direkt in einem Schritt gefunden werden, wenn der vierte Teil von 12 bekannt ist, oder sukzessive, indem auf jeden Teller erst ein Bonbon, dann ein weiteres Bonbon usw. gelegt wird. Beide Wege basieren auf der Grundvorstellung des *Verteilens*.
2. Zum anderen kann die Aufgabe durch Ausmessen gelöst werden, wenn beispielsweise von 12 Bonbons immer vier auf einen Teller gelegt werden sollen. Die Frage lautet dann: „Wie viele Teller werden benötigt?“. Die Antwort darauf kann nun ermittelt werden, indem ausgemessen wird, wie oft die 4 von den 12 abgezogen werden kann bzw. wie oft die 4 in die 12 passt. Die in diesem Fall zugrundeliegende Grundvorstellung wird daher auch als Vorstellung des *Ausmessens* (Wartha & Forcher, 2021) oder des *Enthaltenseins* (Weber, 2013) bezeichnet.

In einer Interviewstudie mit Grundschulkindern ($N=11$) untersuchten Spiegel und Fromm (1996), inwiefern die Wahl der Grundvorstellung zur Lösung einer Divisionsaufgabe von den Lernenden selbst, von der Aufgabenstellung sowie von den verwendeten Zahlen abhängt. Um Ersteres zu klären, wurden den Lernenden zunächst rein formale Divisionsaufgaben (z. B. „ $60 : 12$ “) gestellt. Es zeigte sich, dass die Präferenz der Lernenden für eine der beiden Grundvorstellung individuell unterschiedlich ist. Die Mehrheit der Lernenden bevorzugte überwiegend die Vorstellung des Ausmessens, aber es gab auch einige Lernende, die stärker die Vorstellung des Verteilens bevorzugten.

Um den Einfluss der Aufgabenstellung zu untersuchen, wurden die gleichen Divisionsaufgaben einmal als Verteilungsaufgabe und einmal als Ausmessungsaufgabe gestellt. Der Kontext wurde dabei beibehalten, z. B. „60 Kerzen werden auf 12 Tische verteilt. Wie viele Kerzen sind es?“ (Verteilungsaufgabe) und „Von 60 Tellern werden immer 12 auf einen Tisch gestellt. Wie viele Tische sind es?“ (Ausmessungsaufgabe). Es zeigte sich, dass die verwendete Grundvorstellung häufig mit der

durch die Aufgabenstellung intendierten Vorstellung übereinstimmte. Dies war jedoch nicht bei allen Aufgaben der Fall. Beispielsweise verwendeten die meisten Lernenden bei der Ausmessungsaufgabe „ $100 : 4$ “ nicht die Vorstellung des Ausmessens, sondern die des Verteilens. Die Autoren schließen daraus, dass es auch auf die Zahlen ankommt: Bei großen Dividenden wie 100 und kleinen Divisoren wie 4, bietet die Vorstellung des Verteilens einen leichteren Zugang, während bei größeren Divisoren die Vorstellung des Ausmessens zu bevorzugen ist. Diese Annahme wird durch die unterschiedlichen Bearbeitungszeiten der Lernenden in Abhängigkeit von den gewählten Grundvorstellungen bestätigt (Spiegel & Fromm, 1996). Insgesamt zeigt die Untersuchung also, dass die Wahl einer Grundvorstellung von den Lernenden, der Aufgabe und den Zahlen abhängen kann.

Ergänzend ist anzumerken, dass es auch Aufgaben gibt, bei denen die Lernenden keine Wahl haben, welche Grundvorstellung sie verwenden, da nur eine der beiden Vorstellungen zu einer Lösung führt. Dazu gehören Aufgaben, bei denen der Divisor ein Bruch ist. Soll beispielsweise „ $12 : \frac{1}{2}$ “ berechnet werden, hilft die Vorstellung des Verteilens nicht weiter, da das gleichmäßige Verteilen von 12 Äpfeln auf einen halben Teller entweder zu keiner oder zur falschen Lösung „12“ führt. Dagegen liefert die Vorstellung des Ausmessens eine plausible Interpretation: Wenn von 12 Äpfeln immer ein halber Apfel auf einen Teller gelegt wird, werden insgesamt 24 Teller benötigt, da $\frac{1}{2}$ 24 mal in die 12 passt. Die Vorstellung des Ausmessens eignet sich also besonders gut, wenn es um die Erweiterung des Zahlbereichs und die Bruchrechnung geht (Wartha & Forcher, 2021).

Brüche Für den Bruchzahlbegriff hat man sich in der Literatur im Wesentlichen auf drei Grundvorstellungen geeinigt (Salle & Clüver, 2021; vom Hofe, 2003). Diese sollen im Folgenden anhand des konkreten Bruchs „ $\frac{3}{4}$ “ erläutert werden:

1. *Bruch als Anteil*: Diese Grundvorstellung wird relevant, wenn beispielsweise von einer viertgeteilten Pizza drei Stücke gegessen werden und der gegessene Anteil bestimmt werden soll. Ebenso, wenn sich vier Personen drei Stücke Kuchen gerecht aufteilen möchten und nach dem jeweilige Anteil am Kuchen gefragt wird. In beiden Fällen wird der Bruch $\frac{3}{4}$ dafür verwendet, um den Anteil an einer gegebenen Grundmenge (Kuchen oder Pizza) zu beschreiben. Im ersten Fall entspricht die Grundmenge jedoch *einem* Ganzen, während sie sich im

zweiten Fall aus *mehreren* Ganzen zusammensetzt. Da es sich in empirischen Untersuchungen als besonders schwierig für Lernende erwiesen hat, mehrere Ganze zu einem neuen Ganzen zusammenzusetzen, wird die Formulierung von zwei Grundvorstellungen diskutiert: Bruch als Anteil *eines* und Bruch als Anteil *mehrerer* Ganzen (Salle & Clüver, 2021).

2. *Bruch als Verhältnis*: Bei dieser Grundvorstellung wird der Bruch als ein Verhältnis interpretiert. Werden beispielsweise 150 mL Saft mit 200 mL Wasser gemischt, so beschreibt der Bruch $\frac{3}{4}$, dass die Saftschorle aus 3 Teilen Saft und 4 Teilen Wasser besteht. Durch das Vernetzen dieser mit der vorherigen Grundvorstellung, lässt sich das Verhältnis 3 : 4 auch in Form von Anteilen eines Ganzen ausdrücken. So besteht die Saftschorle insgesamt aus $\frac{3}{7}$ Saft und $\frac{4}{7}$ Wasser.
3. *Bruch als Operator*: Diese Grundvorstellung versteht den Bruch als eine multiplikative Handlungsanweisung. Sollen beispielsweise $\frac{3}{4}$ von 400 g Mehl bestimmt werden, so fungiert der Bruch $\frac{3}{4}$ als reiner Operator, der auf die 400 g angewendet wird mit der Anweisung: „Dividiere die 400 g durch 4 und multipliziere das Ergebnis mit 3!“ Die Operatorvorstellung hängt eng mit der Anteilsvorstellung zusammen. Erstere betont jedoch stärker die *dynamische* Komponente der Herstellung, während Letztere insbesondere die *statische* Komponente in Form eines Ergebnisses hervorhebt (Padberg & Wartha, 2017).

Im aktuellen Mathematikunterricht stützt sich die Erarbeitung des Bruchzahlbegriffs nahezu ausschließlich auf die Anteilsvorstellung sowie ergänzend dazu auf die Operatorvorstellung (Padberg & Wartha, 2017). Dies ist insbesondere auf die Tragfähigkeit dieser Vorstellung für die weitere Bruchrechnung (z. B. Addition von Brüchen) sowie das häufige Vorkommen von Anteilen im alltäglichen Leben zurückzuführen (Streit & Barzel, 2013). Bei der Vermittlung der Anteilsvorstellung nehmen Darstellungen eine zentrale Rolle ein, um das Teilen eines Ganzen in gleich große Stücke zu veranschaulichen. Während zu Beginn häufig Kreise zur besseren Darstellung des Ganzen verwendet werden, dominieren im späteren Verlauf vor allem Rechtecke, da dort die Lernenden einfacher selbst Brüche durch Einzeichnen oder auch Falten eines Papiers darstellen können (Padberg & Wartha, 2017).

Aufgrund der starken Dominanz der Anteilsvorstellung im Mathematikunterricht

plädieren Streit und Barzel (2013) dafür, dass die Verhältnisvorstellung nicht in Vergessenheit geraten darf. Sie bezeichnen diese Vorstellung als „grundlegend, um den späteren Bezug zu Prozents herzustellen und die Brüche in ihrem großen Potenzial zu erfassen“ (Streit & Barzel, 2013, S. 9). Die beiden Autorinnen erachten es allerdings als wichtig, den Bezug zur Anteilsvorstellung herzustellen. Dazu schlagen sie eine Unterrichtseinheit vor, in der zunächst beide Grundvorstellungen separat voneinander erarbeitet und im späteren Verlauf zusammengeführt werden (Streit & Barzel, 2013).

Logarithmus Während die ersten Grundvorstellungen zunächst nur zu mathematischen Begriffen der Grundschule und anfänglichen Mittelstufe formuliert wurden, kamen im Verlauf der Zeit auch vermehrt Grundvorstellungen zu komplexeren mathematischen Begriffen dazu. Beispielsweise entwickelte Weber (2013) erstmalig Grundvorstellungen zum Logarithmus, die er später zu den folgenden vier ausschärfte (Weber, 2016):

1. *Logarithmus als multiplikatives Messen:* Bei dieser Grundvorstellung wird der Logarithmus $\log_a b$ – ähnlich zur Grundvorstellung des Enthaltenseins bei der Division – als Maß dafür interpretiert, wie oft die Basis a wiederholt als Faktor in b enthalten ist bzw. wie oft b durch a dividiert werden muss, bis 1 herauskommt. Beispielsweise gilt $\log_2 16 = 4$, da der Faktor 2 viermal in 16 enthalten ist, bzw. da 16 viermal durch 2 dividiert werden muss, bis 1 herauskommt. Bei dieser Grundvorstellung handelt es sich somit um eine konkrete Handlungsanweisung zur Berechnung des Logarithmus. Sie hat allerdings auch ein gewisses Erklärungspotenzial, da mithilfe der Frage „Wie oft passt die eine Zahl als Faktor in eine andere?“ Gesetzmäßigkeiten wie zum Beispiel $\log_a a^b = b$ begründet werden können (Weber, 2016).
2. *Logarithmus als Zählen der Stellenanzahl:* Diese Grundvorstellung interpretiert den (dekadischen) Logarithmus einer Zahl b als ein Werkzeug, um die um 1 verringerte Anzahl der Stellen dieser Zahl zu bestimmen. Beispielsweise hat die Zahl 4^{5000} insgesamt 3011 Stellen, da $\log_{10} 4^{5000} \approx 3010,3$ gilt.
3. *Logarithmus als Herabsetzung der Hierarchiestufe:* Arithmetische Operationen können in verschiedene Hierarchiestufen eingeteilt werden. Addition und Subtraktion bilden die *erste* Stufe. Da Multiplikation und Division als

wiederholte Addition und Subtraktion aufgefasst werden können, bilden sie die *zweite* Stufe. Analog kann die Potenzierung der *dritten* Stufe zugeordnet werden, da sie als wiederholte Multiplikation aufgefasst werden kann. Die Grundvorstellung besagt nun, dass ein Logarithmus, der auf eine Rechenoperation angewendet wird, deren Hierarchiestufe um eins verringert. So wird beispielsweise das Logarithmusgesetz $\log(ab) = \log a + \log b$ nachvollziehbar.

4. *Logarithmus als inverser Exponent*: Diese Grundvorstellung interpretiert den Logarithmus $\log_a b$ als Gegenspieler des Exponenten in dem Sinne, dass er dem Exponenten entspricht, um welchen die Basis a erhöht werden muss, um b zu erhalten. Somit lässt sich beispielsweise die Frage nach der Lösung der Gleichung $3^x = 81$ umformulieren zu $x = \log_3 81$.

2.2 Merkmale von Grundvorstellungen

2.2.1 Die drei Aspekte nach vom Hofe

Sinnkonstituierung Bei der Betrachtung der vorherigen Beispiele wird deutlich, dass Grundvorstellungen mathematische Begriffe innerhalb bekannter Situationen interpretieren, wie zum Beispiel dem gerechten Verteilen von Gegenständen oder dem Schneiden von Pizzen und Kuchen. Dadurch tragen Grundvorstellungen zur *Sinnkonstituierung* im Sinne der Definition von vom Hofe (1996a) bei. Eine Grundvorstellung lässt sich demnach auch anschaulich beschreiben als „inhaltliche Deutung [eines] Begriffs, die diesem Sinn gibt“ (Greefrath et al., 2016, S. 46). Die Situationen sind dabei keineswegs auf realweltliche Kontexte beschränkt. Auch zunächst *unbekannte*, innermathematische Zusammenhänge können sich durch wiederholtes Behandeln im Mathematikunterricht zu *bekannten* Situationen entwickeln. Sie können dann als Grundlage für die Sinnkonstituierung weiterer Begriffe bzw. für das Ausbilden weiterer Grundvorstellungen dienen. Beispielsweise basiert die Grundvorstellung *Logarithmus als multiplikatives Messen* nicht auf realweltlichen Handlungen, sondern auf mathematischen Operationen und Symbolen. Dennoch baut sie auf einer Handlung auf, die Lernenden bereits von der Division vertraut sein dürfte: das schrittweise Ausmessen nach dem Prinzip „Wie oft passt eine Zahl in eine andere?“ (Weber, 2016).

Anwendung Nicht nur bei der Interpretation mathematischer Begriffe in bekannten Situationen, sondern ebenso beim *Anwenden* dieser Begriffe auf weitere Situationen werden Grundvorstellungen benötigt. Dazu muss die mathematische Struktur der Situation erkannt und die zu dieser Struktur passende Grundvorstellung aktiviert werden. Sei beispielsweise die Situation gegeben, in der bestimmt werden soll, wie viele $\frac{1}{4}$ L Gläser mithilfe einer 2 L Wasserkaraffe befüllt werden können. Dann muss zunächst die Situation als eine Ausmesssituation erkannt und anschließend die entsprechende Grundvorstellung der Division aktiviert werden. „Grundvorstellungen zielen [demnach] auf die Mathematisierbarkeit des strukturellen Kerns einer Situation. Sie sind losgelöst vom konkreten Kontext und daher übertragbar auf strukturell gleiche andere Kontexte“ (Prediger, 2010, S. 12).

Psychologische Repräsentationen Durch die Beschreibung „Grundvorstellung aktivieren“ wird deutlich, dass es sich bei Grundvorstellungen um mentale Denkstrukturen handeln muss. Diese werden als *psychologische* (vom Hofe, 1996a) oder auch *mentale* (Griesel et al., 2019) *Repräsentationen* mathematischer Begriffe bezeichnet. Als solche weisen Grundvorstellungen viele Verbindungen zu anderen Konzepten auf, die sich mit der Beschreibung mentaler Denkstrukturen beschäftigen. In der Literatur lassen sich bereits einige Ansätze finden, die diese Verbindungen aufzeigen (z. B. Kleine et al., 2005; vom Hofe & Blum, 2016). Beispielsweise stellen Kleine et al. (2005) Gemeinsamkeiten von Grundvorstellungen und dem Konzept der *mental Modelle* nach Johnson-Laird (1983) heraus. Sie gelangen zu dem Ergebnis, dass Grundvorstellungen mentale Modelle mathematischer Begriffe sind (Kleine et al., 2005). Diese Bezeichnung ist insofern passend, als das Grundvorstellungen ein operatives Handeln auf der Vorstellungsebene ermöglichen (vom Hofe, 1996a) sowie ein gewisses Erklärungspotenzial besitzen (Weber, 2016) und diese Eigenschaften ebenfalls mentalen Modellen zugeschrieben werden (Nitz & Fechner, 2018). So lässt sich beispielsweise mithilfe mentaler Operationen wie dem Pizzaschneiden oder dem sukzessiven Dividieren erklären, wieso $\frac{2}{3}$ größer als $\frac{1}{2}$ sind oder wieso $\log_a 1 = 0$ gilt.

2.2.2 Verschiedene Arten von Grundvorstellungen

Bei den Beispielen zu den Grundvorstellungen wurde zudem deutlich, dass sich Grundvorstellungen in ihrer Art durchaus unterscheiden können. Beispielsweise ist die Grundvorstellung *Bruch als Anteil* in der Regel visueller Natur und manifestiert sich in Form von Darstellungen oder Darstellungshandlungen, wie etwa Pizzen, Rechtecken oder dem Zerteilen dieser. Die Grundvorstellung *Bruch als Operator* hingegen ist in Form einer konkreten Handlungsanweisung eher verbal geprägt. In der Literatur lässt sich keine umfassende Kategorisierung von Grundvorstellungen finden. Und auch im Forschungsbereich der mentalen Modelle gibt es keine Eini-gung hinsichtlich einer trennscharfen Kategorisierung (Nitz & Fechner, 2018). Dennoch existieren einige Ansätze zur Unterscheidung von Grundvorstellungen, die im Folgenden vorgestellt werden sollen.

Visuell und verbal Die Unterscheidung von Grundvorstellungen in visuell oder verbal wurde bereits im vorherigen Beispiel angedeutet und geht auf Lengnink et al. (2011) zurück.¹ Verbale Vorstellungen liegen in Form von Begriffen und Regeln vor, während visuelle Vorstellungen sowohl Bilder als auch Handlungen umfassen. Eine vergleichbare Klassifikation von Grundvorstellungen findet sich auch bei Salle und Clüver (2021). Allerdings werden Handlungen und Bilder jeweils als separate Kategorien betrachtet und als *enaktiv* bzw. *ikonisch* bezeichnet. Zudem wird statt *verbal* die Bezeichnung *symbolisch* verwendet (Salle & Clüver, 2021).

Primär und sekundär Vom Hofe und Blum (2016) unterscheiden Grundvorstellungen nach der Art der Situation auf die sie sich beziehen. Grundvorstellungen, die sich auf realweltliche Situationen beziehen, bezeichnen sie als *primäre* Grundvorstellungen. Diese treten insbesondere bei mathematischen Begriffen auf, die in der Grundschule oder dem Anfangsunterricht der Sekundarstufe I vermittelt werden. Beispielsweise handelt es sich bei *Bruch als Anteil* oder den Vorstellungen zur Division um primäre Grundvorstellungen, da sie sich auf konkrete, realweltliche Handlungen und Objekte beziehen. Primäre Grundvorstellungen haben demnach einen *gegenständlichen* Charakter (vom Hofe & Blum, 2016). Im Gegensatz dazu lassen

¹Lengnink et al. (2011) unterteilt explizit zwar nur individuelle Vorstellungen in verbal und visuell ein, nimmt diese Unterteilung jedoch auch implizit für Grundvorstellungen vor, indem sie auf den Abgleich individueller Vorstellungen mit den Grundvorstellungen eingeht.

sich fortgeschrittenere mathematische Begriffe, wie etwa der Logarithmus, die Ableitung oder das Integral, nicht immer in realen Kontexten interpretieren. Vielmehr werden Symbole, Graphen oder weitere mathematische Darstellungsmittel benötigt, um diese Begriffe anschaulich zu deuten. Grundvorstellungen zu solchen Begriffen haben demnach symbolischen Charakter und werden als *sekundäre* Grundvorstellungen bezeichnet (vom Hofe & Blum, 2016).

Elementar, erweitert und komplex Blum et al. (2004) nehmen eine sehr ähnliche Kategorisierung vor. Sie unterscheiden zwischen drei Grundvorstellungsarten: den elementaren, erweiterten und komplexen Grundvorstellungen.

Die *elementaren* Grundvorstellungen sind nahezu gleichbedeutend mit den primären Grundvorstellungen.

Ebenso sind die sekundären Grundvorstellungen den *erweiterten* Grundvorstellungen zuzuordnen. Zusätzlich zählen die Autoren noch solche Grundvorstellungen dazu, die sich aus einer nicht trivialen Kombination elementarer Grundvorstellungen ergibt. Dazu gehören alle Kombinationen, die sich nicht aus verwandten Grundvorstellungen (z. B. Addition und Subtraktion oder Multiplikation und Division) zusammensetzen. Ein Beispiel für eine solch nicht triviale Kombination stellt eine Vorstellung zum Mittelwert dar (Blum et al., 2004). Soll das arithmetische Mittel über die Schuhgrößen einer Personengruppe gebildet werden, müssen zunächst alle Schuhgrößen mithilfe der Vereinigungsvorstellung der Addition (vom Hofe, 2003) zusammengefasst und anschließend mithilfe der Verteilungsvorstellung der Division gleichmäßig auf die Anzahl der Personen aufgeteilt werden.

Werden erweiterte Grundvorstellungen wiederum miteinander kombiniert, entstehen *komplexe* Grundvorstellungen. Dies ist beispielsweise bei dem Ableitungsbegriff der Fall, der sich aus dem Änderungsraten- und dem Grenzwertbegriff zusammensetzt (Blum et al., 2004). Auf Basis dieser Kategorisierung formulieren die Autoren Anforderungsniveaus bezüglich der Aktivierung von Grundvorstellungen, mit deren Hilfe sie die Schwierigkeiten von Aufgaben empirisch zeigen können (Blum et al., 2004).

Strukturell und operational Weber (2016) kategorisiert seine hergeleiteten Grundvorstellungen zum Logarithmus auf Basis von Prozess-Objekt-Theorien, die Verständnis als Kombination von Prozessen und Objekten auffassen. Im Be-

sonderen bezieht sich Weber (2016) auf die Theorie von Sfard (1991). Diese unterscheidet zwischen der *strukturellen* und *operationalen* Art, auf welche Weise mathematische Begriffe erfasst oder gedacht werden können. Die strukturelle Weise betrachtet einen mathematischen Begriff als ein statisches Objekt und erfasst diesen im Gesamten, während die operationale Weise dynamischer ist und die Anwendung des Begriffs in Form von Handlungen und Algorithmen fokussiert. Die Autorin betont: „the structural approach invites contemplation; the operational approach invites action; the structural approach generates insight; the operational approach generates result“ (Sfard, 1991, S. 28). Weiterhin erläutert sie, dass die strukturelle Auffassung eher in visueller und die operationale Sichtweise eher in verbaler Form mental repräsentiert sind, dies aber nicht notwendigerweise der Fall sein muss (Sfard, 1991).

Auf Basis der Überlegungen Sfards ordnet Weber (2016) die Grundvorstellung *Logarithmus als inverser Exponent* als strukturell ein, da diese den Logarithmus eher als ein Objekt betrachtet und strukturelle Beziehungen zu dem Begriff des Exponenten herstellt. Die anderen drei Vorstellungen bezeichnet er als operational, da sie konkrete Rechenverfahren implizieren oder Anwendungen des Logarithmus beschreiben (Weber, 2016). Die Kategorisierung der Grundvorstellungen nutzt er, um eine idealtypische Reihenfolge zur Behandlung der Grundvorstellungen im Unterricht vorzuschlagen, die mit den operationalen Vorstellungen beginnt und mit der strukturellen Vorstellung endet. Grundlage dessen stellt die Erkenntnis Sfards dar, dass „in the process of concept formation, operational conceptions would precede the structural“ (Sfard, 1991, S. 10). Sie relativiert allerdings, dass diese Behauptung in manchen Fällen ungeeignet ist. Als Beispiel nennt sie die Geometrie, in denen eine statisch-visuelle Repräsentation in Form eines Kreises einen natürlicheren und einfacheren Zugang ermöglicht, als eine dynamisch-verbale Repräsentation in Form von „Ein Kreis ist eine Kurve, die man erhält, indem man einen Zirkel um einen festen Punkt dreht“ (Sfard, 1991).

Es bleibt anzumerken, dass Sfard (1991) zwar den Begriff *statisch* der strukturellen und den Begriff *dynamisch* der operationalen Sichtweise zuordnet, eine eindeutige Kategorisierung von Grundvorstellungen nach diesen beiden Sichtweisen jedoch nicht möglich ist. Dies liegt darin begründet, dass ein und dieselbe Grundvorstellung je nach Situation dynamischer oder statischer Natur sein kann. Beispielweise lässt sich nach Schulz (2023) die Verteilungsvorstellung der Division sowohl mithil-

fe der dynamischen Situation „12 Bonbons werden gerecht an vier Kinder verteilt. Wie viele Bonbons bekommt jedes Kind?“, als auch mit der statischen Situation „Vier Kinder haben 12 Bonbons. Jedes Kind hat gleich viele. Wie viele Bonbons hat jedes Kind?“ ausdrücken. Die Art der Situation kann dabei einen Einfluss auf die Lösungswahrscheinlichkeit von Lernenden haben (Schulz, 2023).

Situativ, grafisch und abstrakt Prediger (2009) nimmt an, dass ein und dieselbe Grundvorstellung auf drei unterschiedliche Arten mental repräsentiert sein kann. Zunächst kann sie in Form einer *paradigmatischen Mustersituation* inklusive deren Mathematisierung verinnerlicht werden, z. B. als gegessener Anteil einer geteilten Pizza und dessen Mathematisierung in Form eines Bruchs. Eine strukturell ähnliche Situation in der die Gewinnfelder eines Glücksrades beschrieben werden sollen, kann dann auf die gleiche Art mathematisiert werden, wenn die Person die Analogie zur Mustersituation erkennt. Ebenso kann die Grundvorstellung auch mithilfe einer *grafischen Darstellung* als zerschnittene Kreise gedacht oder später auch in *abstrakter Form* als *Anteil eines Ganzen* mental repräsentiert sein. Letztere Form erfasst dabei den strukturellen Kern mehrerer Mustersituationen oder Darstellungen und abstrahiert somit von Konkretisierungen wie beispielsweise Pizzen oder Kreisen (Prediger, 2009).

Fazit Insgesamt konnten verschiedene Ansätze identifiziert werden, Grundvorstellungen zu kategorisieren:

nach Darstellungsform:

- visuell und verbal (Lengnink et al., 2011)
- enaktiv, ikonisch und symbolisch (Salle & Clüver, 2021)
- situativ, grafisch und abstrakt (Prediger, 2009)

nach epistemischer Perspektive:

- operational und strukturell (Weber, 2016)

nach Komplexität:

- elementar, erweitert und komplex (Blum et al., 2004)

nach Realweltbezug:

- primär und sekundär (vom Hofe & Blum, 2016)

Die verschiedenen Ansätze weisen zudem eine Vielzahl an Überschneidungen auf. So können primäre und sekundäre Grundvorstellungen als Teil von elementaren bzw. erweiterten Grundvorstellungen gesehen werden. Zudem tritt die Unterscheidung operativ/strukturell oft gemeinsam mit verbalen bzw. visuellen Darstellungsformen auf. Dies verdeutlicht, dass die Kategorisierungen vielfältig, aber nicht scharf voneinander abgrenzbar sind.

2.2.3 Mehrere Grundvorstellungen zu einem Begriff

Die Beispiele zu Grundvorstellungen verdeutlichen, dass zu einem Begriff niemals nur eine, sondern stets mehrere Grundvorstellungen existieren. Dies liegt darin begründet, dass mathematische Begriffe häufig in vielen, teils strukturell verschiedenen Situationen anwendbar sind und Grundvorstellungen über die strukturelle Gleichheit von Situationen charakterisiert werden. Daraus ergeben sich zwei wichtige Implikationen:

1. *Aufbau möglichst vieler Grundvorstellungen zu einem Begriff:* In Abschnitt 2.2.1 wurde bereits dargelegt, dass zur Anwendung mathematischer Begriffe die Struktur der Situation erkannt und die passende Grundvorstellung aktiviert werden muss. Gleichzeitig wurde anhand der Division verdeutlicht, dass je nach Situation auch nur eine Vorstellung zielführend sein kann, während andere zu keinem oder zu einem falschen Resultat führen können. Ein flexibler Umgang mit mathematischen Begriffen ist dementsprechend abhängig von der Verfügbarkeit und Aktivierbarkeit von geeigneten Grundvorstellungen. Daher „ist der gezielte Aufbau vielfältiger Grundvorstellungen ein zentrales präskriptives didaktisches Prinzip, das Berücksichtigung in jedem mathematischen Themengebiet finden sollte“ (Prediger, 2010, S. 12).
2. *Vernetzen von Grundvorstellungen:* Wie in Abschnitt 2.2.2 anhand des Mittelwerts verdeutlicht, kann für die Konstitution neuer Begriffe, aber auch für das Lösen komplexerer Aufgaben und Probleme, das Kombinieren mehrerer Grundvorstellungen notwendig sein. Diese Kombinationen sind für Lernende

im allgemeinen nicht von allein ersichtlich. Daher ist es wichtig, dass Grundvorstellungen nicht isoliert betrachtet werden, sondern Verbindungen zwischen ihnen aufgezeigt und so miteinander vernetzt werden (Blum & vom Hofe, 2003). Das Ausbilden mehrerer Grundvorstellungen und deren Vernetzung wird als *Grundverständnis* eines Begriffs bezeichnet (vom Hofe, 2003).

2.2.4 Grundvorstellungen als Übersetzungsscharniere

Grundvorstellungen unterstützen das Übersetzen zwischen mathematischen Begriffen und bekannten Situationen, weshalb Prediger (2010) sie auch als *Übersetzungsscharniere* bezeichnet. Werden beispielsweise 21 Stifte auf drei Kinder gerecht verteilt, kann mithilfe der Grundvorstellung des Verteilens die realweltliche Situation als „ $21 : 3$ “ *mathematisiert* und damit in die Welt der Mathematik übersetzt werden. Umgekehrt kann der rein mathematischen Divisionsaufgabe „ $21 : 3$ “ Sinn verliehen werden, indem sie mithilfe von Grundvorstellungen als Verteilungs- oder Ausmessungssituationen *interpretiert* und somit in reale Kontexte übersetzt wird. Grundvorstellungen helfen demnach bei dem Mathematisieren von Situationen sowie dem Interpretieren mathematischer Begriffe, oder anders formuliert: bei dem Übersetzen zwischen realer und mathematischer Welt. Aus diesem Grund wird Grundvorstellungen eine zentrale Rolle im Modellierungsprozess zugeschrieben (Prediger, 2010).

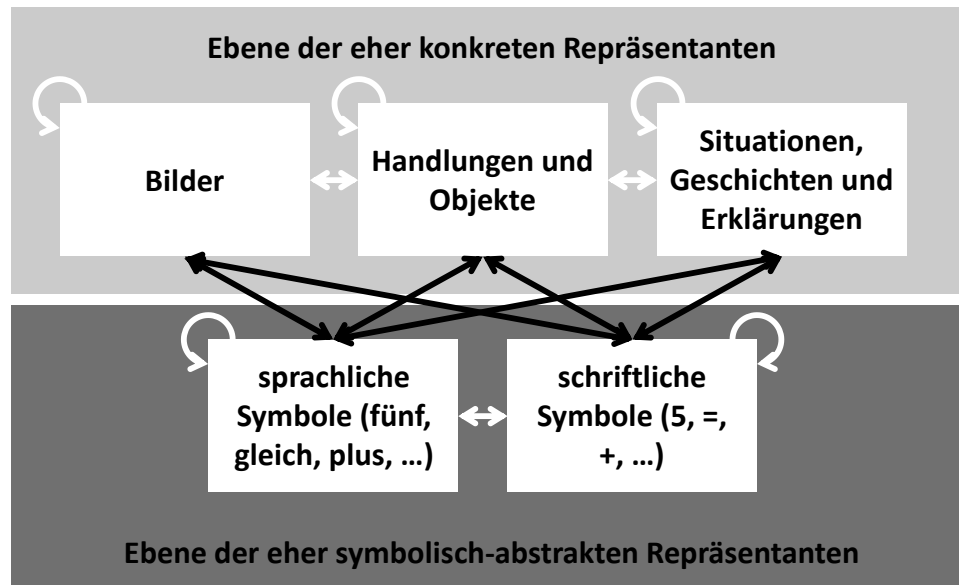
Die Beschränkung der Übersetzungsprozesse auf Realität und Mathematik lässt sich durchaus kritisch sehen. Zum einen ist die Trennlinie zwischen beiden Bereichen unscharf (Wartha & Schulz, 2018) und zum anderen übersetzen sekundäre Grundvorstellungen zumeist innerhalb der Mathematik (vgl. Logarithmus in Abschnitt 2.1). Blum et al. (2004) sprechen dabei auch von einem *innermathematischen Modellieren*. Wartha und Schulz (2018) schlagen deshalb eine Erweiterung vor, indem sie den Bereich *Realität* durch die *Ebene der eher konkreten Repräsentanten* und den Bereich *Mathematik* durch die *Ebene der eher abstrakten Repräsentanten* ersetzen (siehe Abbildung 2.1).

Die Ebenen enthalten insgesamt fünf verschiedene Darstellungsarten². Dazu gehören Bilder, Handlungen und reale Situationen. Die symbolisch-abstrakten Darstel-

²Die Kategorisierung von Darstellungen, die dieser Arbeit zugrunde gelegt werden, sind in Abschnitt 3.3.3 beschrieben.

Abbildung 2.1

Grundvorstellungen als Übersetzungsscharniere zwischen Darstellungen



Anmerkung. In Anlehnung an Wartha und Schulz (2018, S. 30) in der aktuelleren Version von Schulz (2023, S. 12).

lungsarten stellen Symbole dar, die entweder sprachlich oder schriftlich dargestellt werden können.

Wartha und Schulz (2018) merken an, dass Grundvorstellungen vor allem zwischen den Darstellungsarten unterschiedlicher Ebenen übersetzen (schwarze Pfeile), dies allerdings nicht immer der Fall sein muss (weiße Pfeile). Beispielsweise beschreibt die Übersetzung von „ $3^x = 81$ “ zu „ $x = \log_3 81$ “ mithilfe der Grundvorstellung *Logarithmus als inverser Exponent* eine Übersetzung zwischen zwei geschriebenen, mathematisch-symbolischen Darstellungen.

2.2.5 Normative, deskriptive und konstruktive Perspektive

In Abschnitt 2.1 wurden exemplarisch Grundvorstellungen zu verschiedenen Begriffen aufgelistet. Dabei handelt es sich um fachlich anerkannte, idealtypische Vorstellungen, die aus sorgfältigen, fachdidaktischen Analysen abgeleitet wurden (Griesel et al., 2019). Sie fungieren als didaktische Leitlinien für Curricula und Schulbücher und geben Lehrkräften eine Orientierung, welche Vorstellungen Lernende entwickeln *sollen* (Prediger, 2010; Salle & Clüver, 2021). Diese Perspektive

auf Grundvorstellungen wird deshalb auch als *normativ* bezeichnet (vom Hofe & Blum, 2016).

Bis in die 1980er Jahre war dies nahezu die einzige Sichtweise auf das Grundvorstellungskonzept. Seitdem hat sich durch den Einfluss deskriptiver Studien und das Interesse an Lernprozessen von Lernenden eine weitere Perspektive herausgebildet: die *deskriptive* Perspektive. Sie beschreibt Vorstellungen, die Lernende *tatsächlich* ausgebildet haben. Diese individuellen Grundvorstellungen können von den idealtypischen Vorstellungen mehr oder weniger abweichen (vom Hofe & Blum, 2016). Sie werden daher auch mit dem in der Naturwissenschaftsdidaktik bekannten Begriff der *Schülervorstellungen* bezeichnet (Griesel et al., 2019).

Um Missverständnisse zu vermeiden, ist es an dieser Stelle wichtig, eine terminologische Unterscheidung zu treffen:

Der Begriff *Grundvorstellung* wird im Folgenden ausschließlich im normativen Sinne verwendet, also zur Bezeichnung von idealtypischen Vorstellungen, die Lernende entwickeln sollen. Die tatsächlich entwickelten Vorstellungen von Lernenden werden fortan als *individuelle* oder *alternative* Vorstellungen bezeichnet.

Eine Grundannahme des Grundvorstellungskonzepts ist, dass sich die individuellen Vorstellungen der Lernenden durch geeignete Lernsituationen den Grundvorstellungen annähern können. Grundvorstellungen lassen sich demnach ausbilden, was der *konstruktiven* Perspektive auf das Grundvorstellungskonzept entspricht (vom Hofe & Blum, 2016).

Blum und vom Hofe (2003) führen aus, wie diese drei Perspektiven zur Analyse von Aufgaben verwendet werden können. Durch eine *normative* Analyse der Aufgaben wird zunächst bestimmt, welche Grundvorstellungen zur Lösung der Aufgabe notwendig sind. Mittels *deskriptiver* Analyse wird untersucht, welche individuellen Vorstellungen Lernende zur Lösung verwenden. Durch den Vergleich der Ergebnisse beider Analysen lassen sich häufig Erklärungen für den Lösungsweg der Lernenden finden, aus denen sich dann *konstruktive* Ansätze zur Behebung von möglichen Fehlern ergeben können (Blum & vom Hofe, 2003).

2.3 Grundvorstellungen im Chemieunterricht

Eine Übertragung des mathematikdidaktischen Grundvorstellungskonzepts auf Naturwissenschaften im Allgemeinen oder den Chemieunterricht im Speziellen wurde bislang noch nicht vorgenommen.

Allerdings lassen sich in der Literatur einige Publikationen finden, die auf die verschiedenen Bedeutungen mathematischer Begriffe im Chemieunterricht eingehen und damit eine Parallelität zu dem Grundvorstellungskonzept aufweisen.

Dichte Beispielsweise identifizierten Xu und Clarke (2012) auf Basis einer Unterrichtsbeobachtung vier verschiedene Sichtweisen zur Dichte und auch Hawkes (2004) formuliert mehrere Prinzipien, die es bei der Vermittlung der Dichte zu berücksichtigen gilt (siehe Abschnitt 8.2). Xu und Clarke (2012) betonen zudem die Bedeutung des Vermittelns und Vernetzens aller vier Sichtweisen für das Verständnis des Dichtebegriffs: „Arguably, a complete understanding of the concept density requires the integration of the four ideas rather than simply a combination of these four separated ideas“ (Xu & Clarke, 2012, S. 786).

Stoffmenge Darüber hinaus konnte Tullberg (2005) in einer Untersuchung mit Lehrkräften vier verschiedene Konzeptualisierungen zur Stoffmenge identifizieren. 1 mol wurde dort als eine Stoffportion, als eine massenabhängige Größe, als eine Teilchenanzahl oder als eine Einheit aufgefasst. Es zeigte sich, dass die Lehrkräfte bei der Lösung von Problemen flexibel zwischen diesen wechselten, im Unterricht jedoch häufig nur eine der Konzeptualisierungen vermittelten. Tullberg (2005) sieht dabei die Gefahr, dass Lernenden dadurch eine eingeschränkte Perspektive der Stoffmenge vermittelt wird. Im Einklang dazu sehen Fach et al. (2007) die Einführung der Stoffmenge als *Teilchenanzahl* statt als *Menge eines Stoffes* als Ursache dafür, dass Lernende die Stoffmenge scheinbar mit der Teilchenanzahl gleichsetzen und die Vorstellung vertreten, dass die Stoffmenge nicht weniger als 1 mol betragen könne.

Reaktionsgleichungen Zuletzt werden auch die verschiedenen Interpretationsmöglichkeiten von Reaktionsgleichungen in der Literatur diskutiert. So können nach Loeck (1994) Reaktionsgleichungen einerseits *statisch* als gleiche Atommen-

gen vor und nach einer Reaktion oder andererseits *dynamisch* als Umsätze von Atomen während einer Reaktion gelesen werden. Taber (2013) hingegen geht auf die makroskopische und submikroskopische Interpretation von Reaktionsgleichungen ein (siehe Abschnitt 1.3). Mit Bezug zur submikroskopischen Bedeutung betonen Bake und Wloka (2015) zudem, dass Lernenden bewusst gemacht werden sollte, „dass Reaktionsschemata, die auf der Teilchen-Ebene formuliert sind, beliebig oft durchlaufen werden können“ (Bake & Wloka, 2015, S. 22). In einem aktuellen Forschungsprojekt von Hollwedel und Marohn (2023) wird sich den unterschiedlichen Bedeutungen von Reaktionsgleichung unter Bezugnahme zu dem vorliegenden Projekt und dem Grundvorstellungskonzept angenommen.

Insgesamt deuten diese Beispiele an, dass sich auch mathematische Begriffe im Chemieunterricht nicht durch eine einzige, richtige Vorstellung charakterisieren lassen. Vielmehr existieren verschiedene Sichtweisen, Konzeptualisierungen, Lesearten oder Interpretationen, die im Gesamten ein Grundverständnis der Begriffe kennzeichnen. Somit lässt sich die Kernidee des Grundvorstellungskonzepts auch vereinzelt in der chemiedidaktischen Literatur wiederfinden.

2.4 Zwischenfazit

In diesem Kapitel wurde das Grundvorstellungskonzept präsentiert. Ausgehend von der recht vagen Definition von vom Hofe (1996a) wurden zunächst exemplarisch Grundvorstellungen zur Division, zum Bruchzahlbegriff und zum Logarithmus vorgestellt. Dies sollte einen Einblick gewähren, wie der Grundvorstellungs-begriff in der Literatur verstanden und angewendet wird. Auf Basis dieser Beispiele wurden Merkmale von Grundvorstellungen aufgelistet, um die vage Definition zu konkretisieren und auszuschärfen. Ergänzend dazu wurde in Abschnitt 2.3 gezeigt, dass bereits Ansätze in der chemiedidaktischen Literatur existieren, die starke Parallelen mit dem Grundvorstellungskonzept aufweisen.

Als Ergebnis lässt sich festhalten, dass Grundvorstellungen idealtypische, mentale Repräsentationen mathematischer Begriffe sind, die

- eine didaktische Leitlinie für Lehrkräfte bilden,
- den abstrakten Begriff für Lernende veranschaulichen, indem sie ihn in bereits bekannten inner- oder außermathematischen Situationen interpretieren,
- nur einen gewissen Teil des Begriffs erfassen, weshalb immer mehrere Grundvorstellungen zu einem Begriff existieren, die miteinander vernetzt werden sollten,
- ein gewisses Erklärungspotenzial besitzen und Lernende beim Anwenden der Begriffe in bestimmten Situationen unterstützen,
- als Übersetzungsscharniere zwischen Darstellungen fungieren,
- sich in ihrer Art unterscheiden und vielfältig, aber nicht trennscharf kategorisieren lassen (primär, sekundär, enaktiv, ikonisch, operational, strukturell, ...),
- eine theoretische Grundlage zur Analyse von Aufgaben und Leistungsunterschieden von Lernenden in der fachdidaktischen Forschung bilden,
- Parallelen zu weiteren Konzepten zur Beschreibung mentaler Denkstrukturen sowie Ansätzen in der Chemiedidaktik aufweisen.

Insgesamt stellen Grundvorstellungen somit eine unverzichtbare Grundlage für die verständnisorientierte Vermittlung mathematischer Inhalte dar.

Inwiefern sich Grundvorstellungen ausbilden lassen, ist Gegenstand des folgenden Kapitels.

3 Vorstellungsentwicklung

In diesem Kapitel soll eine theoretische Grundlage dafür geschaffen werden, wie sich individuelle Vorstellungen von Lernenden zu den fachlich intendierten, normativen Vorstellungen weiterentwickeln lassen, oder anders ausgedrückt: wie sich Grundvorstellungen ausbilden lassen.

Im vorherigen Kapitel wurde bereits verdeutlicht, dass es verschiedene Arten von Grundvorstellungen gibt. Ähnlich facettenreich sind auch die individuellen Vorstellungen von Lernenden. Um der Vielfalt an individuellen Vorstellungen gerecht zu werden, wird in dieser Arbeit von einem breiten Vorstellungsverständnis ausgegangen.

3.1 Konstruktivistische Perspektive

Dem Lernen und Lehren und damit einhergehend auch der Vorstellungsentwicklung wird in dieser Arbeit ein konstruktivistisches Verständnis zugrunde gelegt. Der Konstruktivismus ist dabei keine einheitlich verstandene Theorie, sondern zeichnet sich durch seine verschiedenen Varianten aus.

Radikaler Konstruktivismus Die Ursprünge finden sich in der Variante des radikalen Konstruktivismus. Diese geht von der grundlegenden Annahme aus, dass es unmöglich ist, die Wirklichkeit zu erkennen, weil jegliche Erkenntnis über die Wirklichkeit menschliche Konstruktion ist. Jede Person konstruiert auf Basis ihrer Wahrnehmung ihre eigene Realität, die durch das gemeinsame Teilen mit anderen Individuen verbindlich wird (Gerstenmaier & Mandl, 1995). Dabei wird nicht die Existenz einer Realität, sondern lediglich die einer objektiven Wahrheit – im Sinne eines korrekten Abbildes der Realität – in Frage gestellt (Möller, 2001b; Terhart, 1999). Während der radikale Konstruktivismus insbesondere als Erkenntnistheorie Anklang fand, wurden erste daraus abgeleitete pädagogische Ansätze als proble-

matisch angesehen. Zu den Vorwürfen zählen unter anderem die Überflüssigkeit von Lehrkraft und Instruktion, die Beliebigkeit des Lernens, die fehlende empirische Evidenz sowie die Vernachlässigung sozialer Aspekte des Lernens (Duit, 1995; Möller, 2001b).

Moderater Konstruktivismus Mit Blick auf das Lehren und Lernen konnte sich deshalb eine moderat-konstruktivistische Sichtweise etablieren (Riemeier, 2007). Diese teilt zwar die konstruktivistische Grundidee des aktiven Konstruierens von Wissen, stellt jedoch im Gegensatz zur radikalen Sichtweise nicht die Existenz einer objektiven Realität in Frage (Widodo & Duit, 2004). Weiterhin zeigt sie sich integrativ gegenüber sozial-konstruktivistischen und kognitionspsychologischen Perspektiven (Gerstenmaier & Mandl, 1995; Möller, 2001b; Widodo & Duit, 2004). Aus der moderat-konstruktivistischer Sichtweise lässt sich Lernen beschreiben als (Reinmann-Rothmeier & Mandl, 2001; Riemeier, 2007):

- *aktiv* und *selbstgesteuert*: Lernen erfordert die aktive Auseinandersetzung der Lernenden mit der Umgebung. Dabei steuern sie den Lernprozess selbst, wobei das Maß an Selbststeuerung variieren kann. Der Lernprozess kann nicht von außen gesteuert, sondern höchstens angeregt werden.
- *individuell* und *konstruktiv*: Lernende konstruieren aktiv Wissen auf Basis ihrer individuellen Gegebenheiten. Dazu gehören sowohl individuelle Kenntnisse und Vorerfahrungen, als auch emotionale Aspekte.
- *sozial* und *situiert*: Lernen ist ein sozialer Prozess, der stets in situativen Kontexten stattfindet. Demnach ist Lernen sowohl an konkrete Inhalte gebunden, als auch von sozialen Interaktionen, wie z. B. dem Aushandeln von Ideen und Vermutungen in einer Gemeinschaft geprägt.

Diese Sichtweise auf das Lernen stellt „den aktiven, selbstgesteuerten, selbstreflexiven Lerner in den Mittelpunkt“ (Gerstenmaier & Mandl, 1995, S. 882), der durch aktive Auseinandersetzung mit seiner Umgebung und auf Basis individueller Vorstellungen Wissen konstruiert.

Zum einen hat dies einen Einfluss auf die Rolle der Lehrkraft während des Lernprozesses. Statt Wissen zu vermitteln können Lehrkräfte lediglich zur Wissenskonstruktion anregen, indem sie Lernumgebungen entwickeln und Lernende während

des Lernprozesses unterstützen (Gebhard et al., 2017; Möller, 2001b). Die aktive Rolle der Lernenden ist allerdings nicht gleichzusetzen damit, „dass Lernende alles allein machen und keinerlei Unterstützung benötigen“ (Riemeier, 2007, S. 74). Vielmehr sollten Lernende durch instruktionale und strukturierende Maßnahmen bei der aktiven Wissenskonstruktion unterstützt werden (Möller, 2007; Riemeier, 2007).

Zum anderen rücken individuelle Vorstellungen in den Fokus des Lernens, da die Wissenskonstruktion stets auf Basis bereits vorhandener Vorstellungen stattfindet. Im konstruktivistischen Sinne lässt sich Lernen auch „als Veränderung von bereits vorhandenen Vorstellungen und Begriffen ansehen“ (Möller, 2010, S. 57). Die konstruktivistische Sichtweise betont zudem den subjektiven und kognitiven Charakter von Vorstellungen (Gropengießer & Marohn, 2018) und ermöglicht es damit Ergebnisse aus Untersuchungen zu individuellen Vorstellungen zu interpretieren (Duit, 1995). Aus diesem Grund wird auch in der vorliegenden Arbeit der Konstruktivismus in seiner moderaten Form als theoretische Grundlage herangezogen.

Individuelle Vorstellungen Auf Basis dieser Grundlage soll nun der Begriff der individuellen Vorstellungen näher bestimmt werden, der bislang nur beiläufig in Abgrenzung zum Grundvorstellungsbegriff benannt wurde, jedoch wesentlicher Bestandteil der vorliegenden Arbeit ist. Er wird in dieser Arbeit als Bezeichnung für mentale Denkstrukturen verwendet, die Lernende zur Erklärung ihrer Erfahrungen anwenden. Da individuelle Vorstellungen stets subjektive Konstruktionen sind (Baalmann et al., 2004), können sie von fachlich intendierten Vorstellungen – den Grundvorstellungen – abweichen. Als Bezeichnung für abweichende Vorstellungen lassen sich in der Literatur neben „individuellen Vorstellungen“ verschiedene Begriffe wie etwa „Schülervorstellungen“, „naive Theorien“, „Präkonzepte“ oder „alternative Vorstellungen“ finden, die im Kern das gleiche bedeuten, jedoch unterschiedliche Akzente setzen (Möller, 2010).

Die Bezeichnung „Fehlvorstellung“ (misconception) wurde vor allem zu Beginn der Vorstellungsforschung verwendet. Sie geriet jedoch aufgrund ihres abwertenden Charakters zunehmend in Kritik, da individuelle Vorstellungen kontextabhängig durchaus angemessen sein und plausible Erklärungsansätze liefern können (Gropengießer & Marohn, 2018). Aus diesem Grund wird die Bezeichnung im Folgen-

den vermieden und stattdessen die neutralen Begriffe *individuelle* und *alternative* Vorstellungen verwendet.

Zuletzt bleibt zu klären, welche mentalen Denkstrukturen genau mit dem Vorstellungsbegriff erfasst werden sollen. Zu Beginn der Vorstellungsforschung wurden insbesondere inhaltliche Vorstellungen zu naturwissenschaftlichen Begriffen und Phänomenen in den Blick genommen. Es zeigte sich allerdings, dass beispielsweise auch wissenschaftstheoretische Vorstellungen zur Natur der naturwissenschaftlichen Erkenntnisgewinnung oder meta-kognitive Vorstellungen zum Lehr- Lernprozessen einen entscheidenden Einfluss auf das Lernen haben können (Duit, 1995). Da solche Vorstellungen über die inhaltliche Ebene hinaus im Rahmen dieser Arbeit nicht explizit erhoben wurden, bezeichnet der Vorstellungsbegriff im Folgenden vor allem inhaltliche Vorstellungen zu mathematischen oder naturwissenschaftlichen Begriffen, Prinzipien, Phänomenen und Situationen. Des Weiteren wird der Vorstellungsbegriff als Oberbegriff für inhaltliche Vorstellungen verschiedener Komplexitätsstufen (Gropengießer & Marohn, 2018) und mentaler Repräsentationsformen verwendet (Lengnink et al., 2011). Analog zu den Grundvorstellungen (siehe Abschnitt 2.2.2) können nämlich auch individuelle Vorstellungen verbal als Aussagen oder Regeln sowie visuell als Vorstellungsbilder oder -handlungen mental repräsentiert sein (Lengnink et al., 2011).

3.2 *Conceptual Change*

Conceptual Change bedeutet übersetzt *Vorstellungsentwicklung*³ und dient als Bezeichnung für das Lernen in den Naturwissenschaften aus konstruktivistischer Perspektive (Duit & Treagust, 2003). Im Wesentlichen verbirgt sich hinter der Bezeichnung jedoch ein Oberbegriff für verschiedene Ansätze zur Beschreibung von Vorstellungsentwicklungsprozessen (Gropengießer & Marohn, 2018).

³*Conceptual Change* bedeutet streng übersetzt eigentlich *Konzeptwechsel* (Gebhard et al., 2017). Reinfried (2010) verweist in diesem Zusammenhang jedoch auf die Problematik der deutschen Übersetzung des Begriffs *concept*. So werde dieser Begriff im Rahmen der Conceptual-Change-Forschung häufiger im Sinne einer *conception*, also einer *Vorstellung* verwendet (Reinfried, 2010). Weiterhin wird inzwischen eher von einer *Entwicklung* oder *Veränderung* als von einem *Wechsel* gesprochen, da ein radikaler Vorstellungswechsel empirisch betrachtet eine Ausnahme darstellt (Gebhard et al., 2017). Dennoch wird *Conceptual Change* häufig als Oberbegriff für die verschiedenen Ansätze zur Beschreibung von Vorstellungsentwicklungen verwendet (Gropengießer & Marohn, 2018).

Der ursprüngliche Ansatz geht dabei auf Posner et al. (1982) zurück, welche Vorstellungsentwicklung mithilfe der beiden Begriffe *Assimilation* und *Akkommodation* von Piaget beschreiben. Die Assimilation tritt ein, wenn Lernende neue Phänomene mit bereits vorhandenen Vorstellungen erklären können. Funktioniert dies nicht, müssen die Vorstellungen modifiziert oder ersetzt werden, um die Phänomene erklärbar zu machen. Dieser Prozess wird als Akkommodation bezeichnet. Posner et al. (1982) halten demnach einen vollständigen Wechsel von Vorstellungen möglich, betonen jedoch, dass dies ein langwieriger Prozess sein kann.

Untersuchungen zeigen allerdings, dass nur selten bestehende alternative Vorstellungen vollständig eliminiert und durch wissenschaftliche Vorstellungen ersetzt werden können (Widodo & Duit, 2005). Häufig koexistieren alternative und wissenschaftliche Vorstellungen nebeneinander oder es bilden sich sogenannte *hybride Vorstellungen* (Widodo & Duit, 2005) bzw. *Syntheseverstellungen* (Vosniadou & Ioannides, 1998), die Facetten beider Vorstellungsarten umfassen. Daraus haben sich weitere Conceptual-Change-Ansätze entwickelt, welche die Koexistenz von alternativen und wissenschaftlichen Vorstellungen keineswegs als ein unerwünschtes Phänomen betrachten, sondern unter Begriffen wie der *Zweisprachigkeit* (Gebhard et al., 2017) oder der *horizontalen Vorstellungsentwicklung* (Lengnink et al., 2011) explizit fordern. Diese Ansätze verfolgen das Ziel, bestehende Schülervorstellungen durch wissenschaftliche Vorstellungen zu ergänzen sowie das reflektierte und situationsangemessene Anwenden dieser zu fördern (Lengnink et al., 2011).

Es gibt noch viele weitere Ansätze zur Beschreibung von Vorstellungsentwicklungen, die nicht alle im Rahmen dieser Arbeit vorgestellt werden können. Es sei auf Potvin et al. (2020) verwiesen, die mehrere Ansätze zusammengetragen und hinsichtlich ihrer empirischen Bestätigung in der Literatur eingestuft haben. Die meisten empirischen Belege finden sich für den Ansatz von Posner et al. (1982).

3.3 Strategien zur Entwicklung von Vorstellungen

3.3.1 Kognitiver Konflikt

Die klassische und häufig angewendete Strategie zur Initiierung einer Vorstellungsentwicklung ist der *kognitive Konflikt*. Dazu werden Lernende mit Informationen

konfrontiert, die im Widerspruch zu ihren bisherigen Vorstellungen stehen und somit nicht assimiliert werden können. Posner et al. (1982) nennen diese Art von Informationen *Anomalien*. Sie betrachten diese als Quelle für einen kognitiven Konflikt, der wiederum die Grundlage für eine Akkommodation bildet:

If taken seriously by students, anomalies provide the sort of cognitive conflict (like a Kuhnian state of “crisis”) that prepares the student’s conceptual ecology for an accommodation. The more students consider the anomaly to be serious, the more dissatisfied they will be with current concepts, and the more likely they may be ready ultimately to accommodate new ones. (Posner et al., 1982, S. 224).

Neben der im zweiten Satz angesprochenen Unzufriedenheit mit der alten Vorstellung nennen Posner et al. (1982) zudem drei weitere Bedingungen, die für eine erfolgreiche Vorstellungsentwicklung notwendig sind:

1. *Verständlichkeit*: Die neue Vorstellung muss so gut verständlich sein, dass die Lernenden erkennen können, wie es ihre Erfahrungen strukturieren kann und welche Möglichkeiten sich daraus ergeben.
2. *Plausibilität*: Die neue Vorstellung sollte glaubwürdig erscheinen und geeignet sein, die Probleme der alten Vorstellung zu lösen. Sie sollte außerdem im Einklang mit bereits vorhandenem Wissen stehen.
3. *Fruchtbarkeit*: Die neue Vorstellung sollte erweiterbar und in anderen Situationen anwendbar sein.

Es bleibt allerdings anzumerken, dass eine Erfüllung all dieser Bedingungen nicht zwingend zu einer Vorstellungsentwicklung im Sinne der Akkommodation führt. Beispielsweise nennen Chinn und Brewer (1993) sieben mögliche Reaktionen, die Lernende bei der Konfrontation mit anomalen Daten zeigen können: a) Ignorieren der anomalen Daten, b) Ablehnen der Daten, c) Ausschließen der Daten aus der bisherigen Theorie, d) Aufschieben der Daten, e) Neuinterpretieren der Daten, f) Peripheres Ändern der bisherigen Theorie oder g) Ändern der bisherigen Theorie. Eine Vorstellungsentwicklung findet demnach nur bei den letzten beiden Reaktionen statt.

Zudem gibt es viele verschiedene Einflussfaktoren auf die Vorstellungsentwicklung (siehe Gropengießer & Marohn, 2018, für eine ausführliche Auflistung). Posner et al. (1982) führen insbesondere kognitive Faktoren auf, wie das Wissenschaftsverständnis, erkenntnistheoretische Überzeugungen oder Wissen in anderen Bereichen, die zur Annahme oder Ablehnung der neuen Vorstellung beitragen können. Pintrich et al. (1993) betonen hingegen den Einfluss motivationaler Faktoren. Sie argumentieren, dass beispielsweise das Interesse oder auch ein ausgeprägtes Leistungsmotiv einen Einfluss auf die Verarbeitungstiefe von Aufgaben haben kann und somit beeinflusst wird, wie plausibel und verständlich eine neue Vorstellung wahrgenommen wird (Pintrich et al., 1993).

Einen weiteren wichtigen Einflussfaktor stellt der soziale Kontext dar (Lin et al., 2016). Durch unterschiedliche Standpunkte innerhalb einer Gruppe können Widersprüche zu eigenen Vorstellungen, sogenannte *sozio-kognitive Konflikte*, ausgelöst werden, die eine Grundlage für Vorstellungsentwicklungen bieten (Gropengießer & Marohn, 2018). Kooperatives Lernen stellt somit eine weitere, nach dem kognitiven Konflikt, zweithäufigste Conceptual-Change-Strategie dar (Lin et al., 2016).

3.3.2 Genetisches Lernen

Der Begriff des genetischen Lernens lässt sich nur schwer theoretisch fassen. So wird er je nach Disziplin zum Teil unterschiedlich interpretiert und es bestehen Bezüge zu verwandten Ansätzen wie *discovery learning*, *scientific inquiry*, forschend-entdeckendes Lernen und kognitiv aktivierendes Lernen (Adamina & Möller, 2010). Insbesondere die Abgrenzung zum entdeckenden Lernen (*discovery learning*) erweist sich als schwierig, da beide Begriffe teilweise synonym verwendet werden (Leuders et al., 2012) und *discovery learning* als englische Übersetzung von genetischem Lernen dient (Prediger et al., 2021).

Im Folgenden wird daher zunächst eine kurze Begriffsklärung vorgenommen, um darauf aufbauend eine Definition des genetischen Lernens zu formulieren, die dieser Arbeit zugrunde liegt. Abschließend wird erläutert, warum genetisches Lernen eine geeignete Strategie zur Vorstellungsentwicklung darstellt, da es als solches in der Literatur kaum diskutiert wird.

Genetisches Lernen nach Wagenschein Ausgangspunkt vieler genetischer Ansätze in den Naturwissenschaftsdidaktiken stellt die Pädagogik nach Wagenschein (1999) dar. In dieser positioniert sich Wagenschein (1999) gegen eine darlegende Unterrichtsform, in welcher Wissen in Form von bereits fertigen Erkenntnissen vermittelt wird. Als Gegenentwurf präsentiert er den genetischen Unterricht, dessen Unterschied er unter anderem am Beispiel der Erdgeschichte verdeutlicht:

[E]in *darlegender* Lehrgang für dieses Thema ... wird von „außen“ her-anführen an das schon geklärte, fertige, dem Lehrer in Raum und Zeit transparente Erdbild. Er wird vielleicht zuerst, wie von weither kom-mend, die Kugelgestalt ins Auge fassen, etwas vorausschicken über die mutmaßliche Entstehung des Erdballs, um dann die einzelnen Teile sei-ner Schale, geordnet nach Aggregatzuständen, vorzunehmen: Gesteins-hülle, Gewässer, Atmosphäre. Ein *genetischer* Lehrgang nun wird etwa dieselben Tatsachen und Theorien – nicht „bringen“, sondern – entde-cken lassen. Er meint die eigentliche, die *lebende*, nicht die ihre Fun-de sichernde und zur Nutzung übersichtlich verwaltende Wissenschaft. (Wagenschein, 1999, S. 80)

Hier wird bereits deutlich, dass das Entdecken ein zentraler Bestandteil des gene-tischen Unterrichts ist. An dieser Stelle ist es jedoch wichtig anzumerken, dass Wa-genschein (1999) seine Unterrichtsform zwar genetisch nennt, diese allerdings das genetische, exemplarische und sokratische Prinzip umfasst.⁴

Eine Zusammenfassung des genetischen Prinzips, die Wagenschein selbst als „sehr schön konzentriert“ (Müller & Schumann, 2022, S. 193) bezeichnet, formuliert Köhnlein:

Genetisches Lehren führt ohne Bruch vom Sehen zum Verstehen, vom Nachdenken über alltägliche und auffällige Naturphänomene in die wis-senschaftliche Erforschung der Natur, wie sie sich in unserer Kultur z. B. in der Physik ausgeprägt hat. Zugleich hält es den Rückweg zu den

⁴Mit dem exemplarischen Prinzip ist die Reduktion der Stofffülle durch die Beschränkung auf ei-nige wenige mustergültige Beispiele gemeint, wohingegen das sokratische Prinzip auf ein Ge-spräch zwischen Lehrkraft und Lernenden abzielt, in welchem die Lehrkraft eine leitende Rolle einnimmt und Fragen der Lernenden provoziert (Möller, 2001a; Wagenschein, 1999).

konkreten Erscheinungen offen und stärkt die Verwurzelung des Fühlens und Denkens in den vorwissenschaftlichen Naturerfahrungen der Kinder. (Müller & Schumann, 2022, S. 193)

Das genetische Prinzip beschreibt somit die forschende Auseinandersetzung mit Phänomenen unter stetigem Bezug zu den vorwissenschaftlichen Erfahrungen der Lernenden.

Entwicklung verschiedener Ansätze Im Laufe der Zeit haben sich verschiedene Ansätze entwickelt, welche die Ideen von Wagenschein aufgreifen, jedoch unterschiedliche Aspekte des genetischen Lernens stärker betonen.

So hat sich beispielsweise im Bereich des Sachunterrichts ein konstruktiv-genetischer Ansatz entwickelt, „der auch unter dem Begriff eines konstruktivistisch orientierten, auf verstehendes, kooperatives und problemorientiertes Lernen ausgerichteten Unterrichts diskutiert wird“ (Möller, 2007, S. 84). Dieser zeichnet sich unter anderem durch Vorstellungsorientierung, aktive Beteiligung der Lernenden, Formulierung und Überprüfung eigener Ideen, sowie das Aufgreifen interessanter Fragen aus dem Alltag der Lernenden aus. Der Ansatz lässt sich daher nur schwer von anderen konstruktivistischen Ansätzen abgrenzen und betont vor allem den Aspekt der forschenden Auseinandersetzung mit Phänomenen des genetischen Lernens.

Im Gegensatz dazu hat sich in der Mathematikdidaktik ein Ansatz entwickelt, der den entdeckenden Aspekt des genetischen Lernens stärker betont. Dieser Ansatz sowie der Bezug zum entdeckenden Lernen sollen im Folgenden dargestellt werden, um darauf aufbauend eine Definition des genetischen Lernens für die vorliegende Arbeit zu formulieren.

Ansatz der Mathematikdidaktik Der Ansatz in der Mathematikdidaktik initiiert genetisches Lernen, indem „Probleme gefunden werden, bei deren Bearbeitung mathematische Begriffe eigenständig nacherfunden und mathematische Zusammenhänge entdeckt werden“ (Leuders et al., 2011, S. 5). Neben dem Entdecken rückt also zusätzlich die Problemorientierung zur Entwicklung mathematischer Begriffe in den Vordergrund, wie die folgende Definition von Leuders et al. (2012) verdeutlicht:

„Genetisches Lernen ist der durch Probleme angestoßene individuelle, aktive Vollzug eines Prozesses der Konstruktion eines mathematischen Begriffes oder Zusammen-

menhangs, der sich schließlich als Lösung des Ausgangsproblem erweist” (Leuders et al., 2012, S. 541).

Anhaltspunkt für die Auswahl geeigneter Probleme kann die historische Genese mathematischer Begriffe bieten, da sich die meisten mathematischen Begriffe im Laufe der Zeit durch das Lösen inner- und außermathematischer Probleme entwickelt haben. Ein historischer Bezug ist für Leuders et al. (2011) jedoch keineswegs eine Notwendigkeit, sondern vielmehr die Zugänglichkeit der Begriffsgenese für die Lernenden. Diese wird durch einen kontextuellen Rahmen geschaffen, der „die Lernenden dazu anregt, auf der Basis ihrer außer- wie innermathematischen Erfahrungen Fragen zu stellen, die sie mit den ihnen verfügbaren Denk- und Handlungsmustern angehen können“ (Leuders et al., 2011, S. 6).

Ergänzend dazu wird der Prozess des genetischen Lernens durch die zu den Problemen übergeordneten Fragen, die sogenannten Kernfragen, gerahmt. Dazu ein kurzes Beispiel (Leuders et al., 2011):

Bei der Kernfrage „Wie kann ich Zahlenangaben von zwei Gruppen vergleichen?“ erkennen die Lernenden anhand des Problems „Wer hat die größeren Füße?“, dass das reine Aneinanderlegen und Messen der Gesamtlänge nicht ausreichend ist, um zu entscheiden, ob die Jungen oder die Mädchen innerhalb einer Klasse die größeren Füße haben. Stattdessen müssen die jeweiligen Gesamtlängen durch die Anzahl der Jungen bzw. Mädchen dividiert werden. So entdecken die Lernenden anhand des Problems eigenständig das arithmetische Mittel, das gleichzeitig die Antwort auf die Kernfrage liefert (Leuders et al., 2011).

Dabei wird die doppelte Funktion von Kernfragen deutlich: Zu Beginn der Begriffsentwicklung (Vorschauperspektive) stellen Kernfragen eine plausible Frage dar, die an die Erfahrungswelt der Lernenden anknüpft und den Lernprozess strukturiert. Nach der Begriffsentwicklung (Rückschauperspektive) kann die Kernfrage mithilfe des entwickelten Begriffs beantwortet werden, wodurch den Lernenden der Sinn und Zweck des Begriffs deutlich wird (Barzel et al., 2011; Leuders et al., 2011).

Die Definition des genetischen Lernens wird von Leuders et al. (2012) selbst als einschränkend bezeichnet, da genetisches Lernen nicht ausschließlich durch das Lösen von Problemen umgesetzt werden kann, sondern beispielsweise auch durch

das aktive Nachvollziehen eines Vortrags. Es bietet sich daher an, die Definition etwas zu erweitern. Ein geeigneter Anhaltspunkt hierfür ist das Entdeckende Lernen.

Entdeckendes Lernen Entdeckendes Lernen ist ein Unterrichtsansatz des Psychologen Jerome Bruner, der im Einklang mit konstruktivistischen Sichtweisen die Aktivität und Selbststeuerung der Lernenden in Lernprozessen betont (Kollosche, 2017). Kennzeichnend für das entdeckende Lernen ist, „dass sich der Lernende auf der Basis angebotener, nicht vorstrukturierter Beispiele, Phänomene, Situationen oder Probleme Wissen in Form von Konzepten oder Zusammenhängen selbst erarbeiten muss“ (Leuders, 2014, S. 2) und dabei typische Aktivitäten wie „Beobachten, Fragen, Vermuten und Ausprobieren“ (Kollosche, 2017, S. 212) durchführt. Hier werden bereits Unterschiede und Gemeinsamkeiten von entdeckendem und genetischem Lernen deutlich: Auch beim entdeckenden Lernen geht es um die Erarbeitung von Begriffen und Zusammenhängen, allerdings stellt die Problemorientierung nur *eine* Möglichkeit der Begriffsentwicklung dar.

Insgesamt unterscheidet Leuders (2014) drei Varianten des entdeckenden Lernens. Bei der *induktiven Begriffsbildung* entwickeln Lernende den Begriff mithilfe von Beispielen und Gegenbeispielen, wie beispielsweise den Symmetriebegriff mithilfe von symmetrischen und nicht-symmetrischen Beispielen. Beim *mathematischen Experimentieren* gehen Lernende analog zu den Naturwissenschaften vor: Sie stellen Vermutungen auf und überprüfen sie mithilfe von Experimenten. Dies kann beispielsweise eine Simulation zur Entdeckung von Zusammenhängen in einem Dreieck sein. Die dritte Variante ist das *problemgenetische Lernen*, die dem obigen Beispiel zum arithmetischen Mittel entspricht. Somit lässt sich genetisches Lernen als ein Bereich des entdeckenden Lernens auffassen (Leuders, 2014).

Bezüglich der Frage nach der Effektivität des entdeckenden Lernens zur Wissensvermittlung gibt es bislang noch keine eindeutige Antwort. Als hinreichend erwiesen gilt allerdings, dass entdeckendes Lernens mit Strukturierungsmaßnahmen (*guided discovery*) effektiver ist als entdeckendes Lernen ohne oder nur geringem Maß an Strukturierung (*pure discovery learning*) (Kirschner et al., 2006; Kollosche, 2017; Leuders, 2014; Mayer, 2004; Möller, 2007). Ein Grund dafür ist das hohe Maß an Freiheit und Selbststeuerung im Rahmen des entdeckenden Lernens, wodurch das Ausrichten der Aufmerksamkeit auf den Lerninhalt ausbleiben oder

insbesondere schwächere Lernende überfordert werden können (Mayer, 2004; Möller, 2007). Insgesamt kann festgehalten werden, „dass die besten Lernerfolge in Bezug auf Wissensvermittlung bei einer Kombination aus Entdeckung und Unterstützung, einer Balance aus Konstruktion und Instruktion erzielt werden“ (Leuders & Prediger, 2012, S. 48).

Eigene Definition Für die vorliegende Arbeit wird genetisches Lernen wie folgt definiert:

Genetisches Lernen ist der durch Beispiele, Phänomene, Situationen oder Probleme angestoßene individuelle, aktive Vollzug eines Prozesses der Konstruktion eines Begriffs oder Zusammenhangs. Teil dieses Prozesses sind entdeckende Tätigkeiten wie beispielsweise das Beobachten, Fragen, Vermuten und Ausprobieren. Zudem wird der Prozess durch Kernfragen gerahmt, die in der Vorschau den Prozess strukturieren und in der Rückschau mithilfe des nachempfundenen Begriffs oder Zusammenhangs beantwortet werden können.

Diese Definition orientiert sich im Wesentlichen an Leuders et al. (2012), nimmt jedoch die Orientierung an Kernfragen als integralen Bestandteil des genetischen Lernens auf. Darüber hinaus werden neben Problemen auch andere Möglichkeiten zur Initiierung von Begriffsentwicklungen sowie das Entdecken stärker betont.

Eignung zur Vorstellungsentwicklung Im Gegensatz zum kognitiven Konflikt wird genetisches Lernen nicht als primäre Strategie zur Vorstellungsentwicklung diskutiert. Dennoch ist genetisches Lernen eine geeignete Strategie, wie die folgenden drei Gründe veranschaulichen:

- *konstruktivistische Arbeitsweise:* Genetisches Lernen schafft einen fruchtbaren Rahmen zur Entwicklung von Vorstellungen, indem es konstruktivistische Ansätze aufgreift. So orientieren sich die Kernfragen an der Erfahrungswelt der Lernenden und knüpfen somit an deren bestehenden Vorstellungen an. Weiterhin arbeiten Lernende beim genetischen Lernen aktiv, selbstgesteuert und entdeckend.

- *Problemorientierung*: Genetisches Lernen weist einen starken Bezug zu problemorientierten Lernen auf, indem es Probleme als mögliche Initiierung des genetischen Lernens, die Rahmung durch Fragen sowie Problemlösehandlungen wie das Fragen und Vermuten umfasst. Dem problemorientierten Lernen wird zugeschrieben, dass es die Aktivierung von Vorwissen, die Qualität von Gruppendiskussionen sowie die Verarbeitungstiefe fördert und damit zu einer Vorstellungsentwicklung beitragen kann (Loyens et al., 2015). Loyens et al. (2015) konnten zudem empirisch belegen, dass problemorientiertes Lernen im Vergleich zu einem Selbststudium oder einer Vorlesung zu einer stärkeren und nachhaltigeren Vorstellungsentwicklung führt.
- *mathewerkstatt*: In der Schulbuchreihe *mathewerkstatt* (Barzel et al., 2011) wird neben weiteren Prinzipien das genetische Prinzip konsequent umgesetzt, um „mit geeigneter Unterstützung die fachlich intendierten Konzepte und die zugehörigen Grundvorstellungen“ (Prediger, 2011b, S. 2) zu vermitteln. Die Wirksamkeit der Schulbuchreihe deutete sich sowohl in mehreren ausgewählten Unterrichtseinheiten, als auch in einer umfassenderen Feldstudie an (Prediger et al., 2021).

3.3.3 Darstellungswechsel

Die Verwendung und der Wechsel zwischen verschiedenen Darstellungen⁵ gilt als ein zentrales Prinzip zur adäquaten Begriffs- und Vorstellungsentwicklung. Insbesondere in der Mathematikdidaktik wird unter der Bezugnahme zu den Arbeiten von Bruner et al. (1971) und später Duval (2006) das Wechseln von Darstellungen als ein zentrales Prinzip zur Vermittlung mathematischer Begriffe hervorgehoben (Kuhnke, 2013; Laakmann, 2013; Roth & Lichti, 2021; Salle et al., 2023; Wessel, 2015; Zwetzschler, 2015). Doch auch für das Lernen in den Naturwissenschaften wird dies als zentral erachtet (Ainsworth, 2008; Corradi et al., 2012; Gilbert & Treagust, 2009; Nakhleh & Postek, 2008). Leisen (2005) sieht im Darstellungswechsel sogar ein Unterrichtsprinzip für alle Fächer.

Im Folgenden wird zunächst auf den Begriff der *Darstellungen* und deren Kategorisierung eingegangen. Anschließend wird das Prinzip des *Darstellungswechsels* er-

⁵In der englischsprachigen Literatur ist dies unter dem Begriff *Multiple External Representations (MERs)* zu finden (z. B. Ainsworth, 2008).

läutert und dessen Bedeutung für die Vermittlung theoretischer Begriffe im Allgemeinen und für Grundvorstellungen im Speziellen dargelegt.

Darstellungen

Definition Im Zusammenhang mit Darstellungen lassen sich weder einheitliche Bezeichnungen noch präzise Definitionen finden. So werden beispielsweise Bezeichnungen wie „Repräsentationen“, „Visualisierungen“ oder „Veranschaulichungen“ verwendet, die im Kern das Gleiche bezeichnen, jedoch teils unterschiedliche Bedeutungsschwerpunkte setzen (Salle et al., 2023). In der englischsprachigen Literatur wird insbesondere der Begriff „representations“ häufig verwendet. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Bezeichnung „Darstellungen“ verwendet, der analog zu Salle et al. (2023) als ein für die vorherigen Bezeichnungen umfassender Oberbegriff verstanden wird zur Bezeichnung für „alles empirisch Wahrnehmbare, das auf ... Beziehungen, Objekte, Strukturen und Prozesse verweisen kann“ (Salle et al., 2023, S. 437).

Darstellungsebenen Eine Konkretisierung dieser Definition soll im Folgenden mithilfe von Beispielen sowie der Kategorisierung von Darstellungen vorgenommen werden.

In der Literatur lassen sich verschiedene dieser Kategorisierungen finden, die sich hinsichtlich der Anzahl und Art der Kategorien unterscheiden. Eine dieser Kategorisierungen wurde bereits in Abschnitt 2.2.4 vorgestellt.

Eine in der Mathematikdidaktik häufig rezipierte Kategorisierung ist die auf Jerome Bruner zurückgehende Dreiteilung von Darstellungen in die *enaktive*, *ikonische* und *symbolische* Darstellungsebene, die sich in Anlehnung an Salle et al. (2023) wie folgt definieren lassen:

Die enaktive Ebene umfasst dabei die Darstellung von Begriffen durch Handlungen, wie beispielsweise die Darstellung eines Bruchs durch das Schneiden einer Pizza.

Die ikonische Ebene beschreibt bildliche Darstellungen, die einen unterschiedlich starken Bezug zu enaktiven Darstellungsformen aufweisen können. So weist eine Streifentafel lediglich strukturelle Gemeinsamkeiten mit dem Schneiden einer Pizza auf. Ein Kreisdiagramm oder ein Bild von einer Pizza haben dagegen auch phy-

sische Merkmale mit der enaktiven Darstellung gemeinsam. Auch abstrakte ikonische Darstellungen wie Graphen werden der ikonischen Ebene zugeordnet.

Die symbolische Darstellungsebene umfasst „sprachbasierte Zeichen, die von der Alltagssprache über die Fachsprache bis hin zur mathematischen Symbolsprache reichen und dem spezifischen Inhalt in nichts mehr ähneln“ (Salle et al., 2023, S. 434).

Leisen (2005, 2013) hat die Kategorisierung von Bruner aufgegriffen, erweitert und in ein fächerübergreifendes Unterrichtsprinzip integriert. Insgesamt unterscheidet er zwischen den folgenden fünf verschiedenen Darstellungsebenen, die nach aufsteigendem Abstraktionsgrad sortiert sind (Leisen, 2005, 2013):

- *gegenständlich*: Objekte, Experimente und Handlungen
- *bildlich*: Bilder, Filmleisten, Zeichnungen und Piktogramme
- *sprachlich*: mündliche sowie schriftliche Sprache, textlastige Mindmaps und Gliederungen
- *symbolisch*: Strukturdiagramme, Flussdiagramme, Graphen und Tabellen
- *mathematisch*: Gesetze und Formeln

Aufgrund des fächerübergreifenden Ansatzes erweisen sich die Darstellungsebenen nach Leisen als besonders gewinnbringend für die vorliegende Arbeit und sollen im daher im Folgenden als Grundlage zur Kategorisierung von Darstellungen dienen. Da sich allerdings begriffliche Überschneidungen der Darstellungsebenen mit den Johnstone-Ebenen ergeben, wird zunächst eine inhaltliche Abgrenzung vorgenommen.

Abgrenzung zu den Johnstone-Ebenen Die Abgrenzung der Johnstone-Ebenen von den Darstellungsebenen nach Leisen erfolgt nach den Ausführungen von Haas (2021), da dieser ein gleiches Verständnis der Johnstone-Ebenen zugrunde legt. In der Tabelle 3.1 ist der Zusammenhang zwischen den Johnstone-Ebenen und Darstellungsebenen nach Leisen dargestellt.

Tabelle 3.1

Zusammenhang zwischen den Johnstone-Ebenen und den Darstellungsebenen nach Leisen anhand von Beispielen

Darstellungsebenen ^a	Johnstone-Ebene		
	makroskopisch	submikroskopisch	symbolisch
gegenständlich	Experimente	haptische Strukturmodelle	—
bildlich	Skizzen von Versuchsaufbauten	Animationen zu Teilchenbewegungen	—
sprachlich	Formulierung von Beobachtungen	Erklärung von Reaktionsmechanismen	verbale Kommunikation über Formeln
symbolisch	Strukturdiagramm zur Einteilung von Stoffen und Stoffgemischen	Flussdiagramm zur Darstellung komplexer Reaktionsprozesse	Elementsymbole
mathematisch	—	—	Summenformeln

^a Nach aufsteigendem Abstraktionsgrad angeordnet.

Daraus wird ersichtlich, dass die Johnstone-Ebenen durch verschiedene Darstellungen repräsentiert werden können. Ein Wechsel der Darstellungsebenen geht somit nicht zwingend mit einem Wechsel der Johnstone-Ebenen einher.

Zudem wird deutlich, dass die symbolische Ebene nach Leisen nicht mit der nach Johnstone gleichzusetzen ist. So ordnet Leisen (2013) Struktur- und Flussdiagramme der symbolischen Ebene zu, während sie nach Haas (2021) in Abhängigkeit vom Inhalt der makroskopischen oder submikroskopischen Ebene zugeordnet werden kann.

Statische und dynamische Darstellungen Neben den vorgestellten Darstellungsebenen gibt es eine weitere Unterscheidung von Darstellungen, die für die

vorliegende Arbeit von Bedeutung ist: Die Unterscheidung zwischen *statischen* und *dynamischen* Darstellungen.

In Abschnitt 2.2.2 wurde bereits angedeutet, dass mathematische Inhalte dynamisch betrachtet werden können, wenn Prozesse und Änderungen im Fokus stehen oder statisch, wenn beispielsweise Zustände miteinander verglichen werden (vgl. dynamische und statische Betrachtung eines Kreises (Sfard, 1991) sowie der Verteilvorstellung der Division (Schulz, 2023)). Aber auch chemische Inhalte lassen sich teilweise sowohl statisch, als auch dynamisch betrachten, wie die dynamische und statische Leseart von Reaktionsgleichungen nach Loeck (1994) verdeutlicht (siehe Abschnitt 2.3).

Neben den mathematischen oder chemischen Inhalten können jedoch auch Darstellungen dynamischer oder statischer Natur sein. Beispiele für statische Darstellungen sind Standbilder, Gegenstände oder Texte und für dynamische Darstellungen Videos oder Animationen. Der Unterschied zwischen statischen und dynamischen Darstellungen ist, dass dynamische Darstellungen ihre grafische Struktur während der Präsentation verändern (Rolfes et al., 2020). Können Nutzende einen Einfluss auf diese Veränderungen nehmen, werden diese Darstellungen als *interaktiv-dynamisch* bezeichnet (Rolfes et al., 2020). Das Maß an Interaktion kann dabei stark variieren von beispielsweise der Bestimmung der Abspielgeschwindigkeit einer Animation bis hin zur Veränderung der enthaltenen Informationen (Wilzek, 2021).

Es ist anzumerken, dass Inhalte und Darstellungen hinsichtlich ihrer Dynamik nicht zwingend übereinstimmen müssen. Beispielsweise kann der dynamische Lösungsvorgang von Salz in Wasser statisch mithilfe von mehreren Standbildern dargestellt werden. Es besteht allerdings die Annahme, dass statische Darstellungen den dynamischen in der Darstellung dynamischer Inhalte unterlegen sind (Rolfes et al., 2020). Zudem gibt es einige empirische Hinweise, die diese Annahme bestätigen (Kühl et al., 2011). Als Erklärung dafür wird die geringere extrinsische Belastung genannt, da bei dynamischen Darstellungen Veränderungen direkt wahrnehmbar sind, während sie bei statischen Darstellungen selbstständig abgeleitet werden müssen (Kühl et al., 2011).

Darstellungswechsel und dessen Bedeutung für die Begriffs- und Vorstellungsentwicklung

Definition Unter dem Begriff des Darstellungswechsels lassen sich verschiedene Aktivitäten zusammenfassen, die einen Umgang mit mehreren Darstellungen beschreiben. Darstellungswechsel können sowohl zwischen als auch innerhalb von Darstellungsebenen stattfinden (Kuhnke (2013) bezeichnet dies als *inter- und intramodale Wechsel*, Duval (2006) als *conversions* und *treatments*).

Beispiele für Darstellungswechsel sind das Einblenden einer Versuchsskizze zu einem Experiment (Leisen, 2005) oder das Zeichnen eines Graphen zu einer gegebenen Funktionsgleichung (Duval, 2006).

Wessel (2015) formulieren verschiedene Aufgaben, um Darstellungswechsel zu initiieren, wie etwa (a) das Auffordern zur Übersetzung einer Darstellung in eine andere, (b) das Erklären einer (Nicht-)Passung zwischen zwei Darstellungen oder (c) das gegenseitige Zuordnen verschiedener Darstellungen.

Eine weit verbreitete Aktivität zum Wechsel von Darstellungen ist das *operative* oder auch *systematische Variieren* von Darstellungen (Duval, 2006; Salle et al., 2023; Wessel, 2015). Damit sind zielgerichtete Veränderungen von Darstellungen gemeint, wie etwa das schrittweise Verfeinern von Brüchen anhand eines Bruchstreifenbildes (Wessel, 2015), wodurch das „Erkennen und Erlernen mathematischer Begriffe, Zusammenhänge und Strukturen ermöglicht“ (Salle et al., 2023, S. 442) wird.

Nachdem nun das Prinzip des Darstellungswechsels erläutert wurde, sollen im Folgenden theoretische und empirische Gründe dargelegt werden, inwiefern die Verwendung und der Wechsel zwischen verschiedenen Darstellungen im Allgemeinen für das Lernen sowie im Speziellen für die Vermittlung theoretischer Begriffe und Grundvorstellungen von Bedeutung ist.

Cognitive Theory of Multimedia Learning (CTML) Der Nutzen von Darstellungen für das Lernen im Allgemeinen lässt sich mithilfe der Cognitive Theory of Multimedia Learning (CTML) nach Mayer (2021a) erklären. Grundlage dieser Theorie ist die Teilung des Gedächtnisses nach Atkinson und Shiffrin (1968) in drei Bereiche: Im *sensorischen Gedächtnis* werden auditiv und visuell wahrgenommene Informationen aufgenommen und kurzzeitig gespeichert. Durch das Lenken der Aufmerk-

samkeit auf relevante Informationen gelangen diese in das *Arbeitsgedächtnis*. Dort können die Informationen unter Berücksichtigung des Vorwissens aktiv verarbeitet und so im *Langzeitgedächtnis* gespeichert werden (Scheiter et al., 2020).

Die CTML trifft drei zentrale Grundannahmen (Mayer, 2021a; Scheiter et al., 2020): Die erste ist die *Limited-Capacity Assumption*. Diese ist im Einklang mit der Cognitive Load Theory nach Sweller et al. (2011) und geht davon aus, dass das Arbeitsgedächtnis über eine begrenzte Aufnahmekapazität verfügt. Wird diese überschritten, kommt es zu einer kognitiven Überlastung und einer Beeinträchtigung des Lernprozesses. Die Belastung des Arbeitsgedächtnisses ergibt sich aus der Summe drei verschiedener Belastungsarten:⁶

- *intrinsische Belastung*: ergibt sich aus der Komplexität des Lerninhalts selbst
- *extrinsische Belastung*: ergibt sich aus der Präsentation des Lerninhalts und trägt nicht zur Erreichung des Lernziels bei
- *lernbezogene Belastung*: ergibt sich aus der aktiven Verarbeitung und Organisation der Informationen

Ziel sollte es sein, die extrinsische Belastung durch eine angemessene Gestaltung von Lernmaterialien zu reduzieren, sodass mehr Kapazität für die intrinsische und lernbezogene Belastung zur Verfügung steht (Mayer, 2021a).

Die zweite ist die *Dual-Channel Assumption*. Diese geht von zwei verschiedenen Kanälen der Informationsverarbeitung aus, die sich durch die Art der Aufnahme im sensorischen Gedächtnis (visuell vs. akustisch) sowie der zu verarbeitenden Darstellungsart im Arbeitsgedächtnis (verbal vs. bildlich) voneinander unterscheiden. Die Informationen der beiden Kanäle werden im Arbeitsgedächtnis separat voneinander zu einem verbalen und einem bildlichen Modell organisiert, die anschließend unter Einbezug des Vorwissens integriert und im Langzeitgedächtnis gespeichert werden können.

Zur Unterstützung dieses Prozesses sollten Lernenden gleichzeitig verbale und bildliche Informationen zur Verfügung gestellt werden, statt nur eine der beiden Darstellungsformen. Dies ist unter dem *Multimediaeffekt* bekannt und empirisch belegt (Mayer, 2021b).

⁶Es werden hier die Bezeichnungen nach Sweller et al. (2011) verwendet, die Mayer (2021a) selbst als bedeutungsgleich mit seiner Unterteilung ansieht.

Nach Mayer (2021a) umfassen verbale Darstellungen gesprochene und schriftliche Texte, während zu bildlichen Darstellungen statische und dynamische Darstellungen, wie etwa Fotos, Animationen und Videos zuzuordnen sind. Schnotz (2021) erweitert das Verständnis beider Darstellungsarten mit den Begriffen „beschreibend (descriptive)“ und „abbildend (depictive)“. Zu ersterem zählt er neben Texten alle weiteren symbolhaften Darstellungen wie mathematische Gleichungen, zu letzterem zusätzlich Darstellungen der gegenständlichen Ebene.

Die dritte ist die *Active-Processing Assumption*. Diese geht davon aus, dass Lernende selbst aktiv an der kognitiven Informationsverarbeitung beteiligt sind: „humans are active processors who seek to make sense of multimedia presentations“ (Mayer, 2021a, S. 61). Die kognitiven Prozesse der Informationsverarbeitung wurden bereits beschrieben und umfassen das Auswählen relevanter Informationen aus dem sensorischen Gedächtnis, das Organisieren dieser Informationen zu einem verbalen und bildlichen Modell sowie das Integrieren beider Modelle.

Insgesamt verdeutlicht die CTML die Relevanz der Verwendung und des Wechsels zwischen verschiedenen Darstellungen zumindest für verbale und bildliche bzw. beschreibende und abbildende Darstellungen. Darüber hinaus bietet die CTML eine theoretische Grundlage für das Lernen mit mehreren Darstellungen und liefert zudem empirisch belegte Prinzipien für die Gestaltung von Lernmaterialien. Einige dieser Gestaltungsprinzipien dienen als Leitlinie für die im Rahmen dieser Arbeit gestalteten Lernmaterialien und lassen sich wie folgt formulieren (Mayer, 2021a):

- *Kohärenzprinzip*: Zusätzliche, für den Lerninhalt irrelevante Informationen sollten vermieden werden.
- *Signalisierungsprinzip*: Wichtige Inhalte und Zusammenhänge sollten grafisch hervorgehoben werden.
- *Räumliches Kontiguitätsprinzip*: Zusammengehörige Elemente sollten räumlich nah beieinander platziert werden.
- *Zeitliches Kontiguitätsprinzip*: Zusammengehörige Elemente sollten zeitgleich präsentiert werden.

- *Segmentierungsprinzip*: Lerninhalte sollten in Abschnitten präsentiert werden.
- *Multimediaprinzip*: Es sollten sowohl verbale als auch bildliche Informationen zur Verfügung gestellt werden, statt nur eine der beiden Darstellungsformen.

Theoretische Begriffe und Grundvorstellungen Die Notwendigkeit, verschiedene Darstellungsformen zu nutzen und zwischen ihnen zu wechseln, ergibt sich aus der Besonderheit theoretischer Begriffe und gilt daher insbesondere für mathematische und chemische Begriffe. Da theoretische Begriffe keine direkt wahrnehmbaren Entsprechungen besitzen, können diese lediglich durch verschiedene Darstellungen erschlossen werden. Um eine Gleichsetzung der Darstellungen mit dem theoretischen Begriff selbst zu vermeiden, sollte zwischen Darstellungen gewechselt werden, da unterschiedliche Darstellungen verschiedene Aspekte eines Begriffs hervorheben (Duval, 2006): „In dem Wechsel der Darstellungen werden Relationen zwischen den Repräsentationen deutlich. Je vielfältiger diese Relationen sind, umso umfassender sind die Vorstellungen von den Bedeutungen des Begriffs“ (Laakmann, 2013, S. 36).

Insbesondere im Zusammenhang mit Grundvorstellungen wird der Darstellungswechsel als wesentlich erachtet. Dies ergibt sich einerseits dadurch, dass Grundvorstellungen als Voraussetzung für den Darstellungswechsel gesehen werden (siehe Abschnitt 2.2.4). Anhand von Fallbeispielen zeigen Salle et al. (2023) auf, inwiefern Lernende bei der Bearbeitung mathematischer Aufgaben zwischen Darstellungen wechseln und dabei vorhandene Grundvorstellungen ersichtlich werden. Der Wechsel zwischen Darstellungen kann demnach auch als Diagnose von Grundvorstellungen verwendet werden (Prediger, 2009).

Andererseits werden Grundvorstellungen nicht nur für den Darstellungswechsel benötigt, sondern auch umgekehrt durch diesen trainiert (Roth & Lichti, 2021). Hierfür lassen sich mehrere empirische Hinweise finden (Laakmann, 2013; Prediger, 2011a; Prediger & Schink, 2009; Wessel, 2015; Zwetzschler, 2015). Eine explizite Verbindung zwischen dem Darstellungswechsel und dem Aufbau von Grundvorstellungen zeigt Prediger (2009) auf. So geht sie wie bereits in Abschnitt 2.2.2 dargelegt von der These aus, dass Grundvorstellungen auf verschieden Arten men-

tal repräsentiert sein können (als Mustersituation, graphisch oder abstrakt), die jeweils strukturelle Gemeinsamkeiten mit den entsprechenden Darstellungen aufweisen. Das Wechseln zwischen den Darstellungen ist somit wichtig, um die verschiedenen Repräsentationsformen der Grundvorstellungen auszubilden.

Darüber hinaus können je nach Darstellung Grundvorstellungen unterschiedlich gut ersichtlich sein, wie Laakmann (2013) für den Funktionenbegriff darlegt. Beispielsweise lässt sich die Kovariationsvorstellung, die Auswirkungen einer Größe auf eine weitere Größe erfasst (Greefrath et al., 2016), anhand des Verlaufs eines Graphen besonders deutlich erkennen, während sie bei der algebraischen Darstellung nur indirekt sichtbar ist und über Kenngrößen erschlossen werden muss (Laakmann, 2013). Demnach ist ein Darstellungswechsel sinnvoll, um Lernenden den Zugang zu den verschiedenen Grundvorstellungen zu erleichtern.

Eine Betrachtung des Darstellungswechsels aus einer sprachlichen Perspektive liefert weitere Erkenntnisse zur Ausbildung von Grundvorstellungen. So bietet ein Darstellungswechsel immer „Gelegenheiten zum Sprechen, zum Schreiben und zum Lesen“ und damit einen „Anlass zur fachlichen Kommunikation“ (Leisen, 2013, S. 5). Das Kommunizieren mit und über Darstellungen kann mit Bezug auf die Vorstellungsentwicklung als wesentlich erachtet werden. Zum einen wird davon ausgegangen, dass das Kommunizieren von Deutungen aber auch Handlungen im Umgang mit Darstellungen „Spuren im Kopf“ (Salle et al., 2023, S. 443) hinterlässt, die das Ausbilden von Grundvorstellungen unterstützen können. Zum anderen können Darstellungen mehrdeutig sein, wodurch das ständige Aushandeln von Bedeutungen in einem sozialen Austausch erforderlich ist. Durch den Austausch über möglicherweise voneinander abweichenden individuellen Interpretationen von Darstellungen können sozio-kognitive Konflikte entstehen (Salle et al., 2023, spricht von *produktiven Irritationen*), die zu einem Weiter- oder Umdenken und damit zu einer Vorstellungsentwicklung führen können. Die Bedeutung sozio-kognitiver Konflikte für die Vorstellungsentwicklung wurde bereits in Abschnitt 3.3.1 erwähnt.

Darüber hinaus kann ein Wechsel in eine Darstellungsebene geringerer Abstraktion den Zugang für Lernende zum Lerninhalt erleichtern oder überhaupt erst ermöglichen: „was ein Lerner in der einen Darstellungsform nicht versteht, erschließt sich ihm vielleicht in einer anderen besser oder überhaupt erst. Somit arbeiten die Darstellungsformen einander wechselseitig zu und deren Wechsel erweist sich oft

als didaktischer Schlüssel zum fachlichen Verstehen“ (Leisen, 2013, S. 5). Auch auf sprachlicher Ebene können insbesondere bildliche Darstellungen den Zugang zum Lerninhalt erleichtern, indem sie das Nutzen deiktischer Argumentationsmittel ermöglichen und so sprachlich entlasten (Wessel, 2015).

3.4 Potenzial von Simulationen

In diesem Abschnitt soll auf das Potenzial von Simulationen in Bezug auf die Vorstellungsentwicklung eingegangen werden. Die Ausführungen erfolgen in einem eigenen Abschnitt und nicht als Unterpunkt von Abschnitt 3.3, da Simulationen weniger eine eigenständige Strategie zur Vorstellungsentwicklung darstellen, sondern vielmehr als Methode zur Umsetzung der zuvor vorgestellten Strategien dienen.

Definition Simulationen werden im Rahmen dieser Arbeit als digitale dynamische Darstellungen eines Systems betrachtet, deren Inhalt Lernende interaktiv verändern können, um das System näher zu untersuchen. Damit sind das System betreffende Veränderungen gemeint, die beispielsweise über das reine Kontrollieren der Darstellungsgeschwindigkeit eines linearen Ablaufs (z. B. in Form einer Animation) hinaus gehen (Wörler, 2018). Ein Beispiel für eine Simulation ist die mithilfe von GeoGebra entwickelte Lernumgebung von Kostić et al. (2016), in welcher Lernende mithilfe von Schiebereglern die Stoffmengen und Volumina zweier Lösungen verändern und die Auswirkungen auf das Mischungsverhalten der Lösungen algebraisch und grafisch beobachten können. Weitere Simulationen in Form von GeoGebra-Anwendungen lassen sich insbesondere in der Mathematikdidaktik finden (Greefrath & Ulm, 2021; Wörler, 2018; Zengin, 2018).

Potenzial Das Potenzial von Simulationen für die Vorstellungsentwicklung ergibt sich insbesondere dadurch, dass Simulationen die beiden vorgestellten Strategien zur Vorstellungsentwicklung *genetisches Lernen* und *Darstellungswechsel* verwirklichen können.

Die Verwirklichung des genetischen Lernens wird insbesondere durch den Einsatz von Simulationen als *explorative* und *hypothesentestende* Lernumgebung ermöglicht. Dabei geht es darum, dass die Lernenden „durch das eigene Experimentieren

und Erkunden die Variablen und deren Zusammenhänge in dem jeweiligen Themenbereich identifizieren und verstehen können“ und so „ein korrektes mentales Modell dieser Zusammenhänge aufbauen“ (Zumbach, 2010, S. 116–117). In einem zyklischen Prozess stellen sie dabei Hypothesen auf, überprüfen diese mithilfe der Simulation und ziehen entsprechende Schlussfolgerungen, die zu einer Revision der anfänglichen Hypothesen und einem erneuten Durchlaufen des Prozesses führen können. Das Erschließen der Zusammenhänge kann entweder ein expliziter Arbeitsauftrag oder an ein zu lösendes Problem geknüpft sein (Zumbach, 2010).

Insgesamt können somit Simulationen aufgrund der Möglichkeiten des aktiven und selbstgesteuerten Entdeckens sowie der Problemanbindung als ein geeignetes Werkzeug zur Verwirklichung des genetischen Lernens betrachtet werden. Im Rahmen der *mathewerkstatt* (siehe Abschnitt 3.5) werden sie dafür auch explizit eingesetzt (Leuders, 2019).

Auch zur Verwirklichung des Darstellungswechsels stellen Simulationen ein geeignetes Werkzeug dar. So werden in Simulationen häufig verschiedene Darstellungen miteinander kombiniert (Zumbach, 2010), wie etwa grafische und algebraische Darstellungen in der Simulation von Kostić et al. (2016). Zudem wird aufgrund des teils hohen Grades an Interaktivität bei Simulationen, gegeben durch die Möglichkeit der direkten Veränderung der Darstellungen, das Ansprechen der enaktiven Darstellungsebene diskutiert (Kimeswenger & Hohenwarter, 2015; Wilzek, 2021). Darüber hinaus können mithilfe von Simulationen auch Darstellungen innerhalb einer Darstellungsebene im Sinne des systematischen Variierens gezielt verändert und die Auswirkungen dieser Veränderungen wahrgenommen werden. Der Vorteil gegenüber statischen Darstellungen wird darin gesehen, dass die Veränderungen direkt beobachtbar sind und nicht in die statischen Darstellungen hineingesehen werden müssen. Zudem können deutlich mehr Fälle als bei statischen Darstellungen betrachtet werden, wodurch bei dynamischen Darstellungen ein höherer Allgemeingrad erreicht wird (Wilzek, 2021).

Herausforderungen Neben dem Potenzial von Simulationen für die Vorstellungsentwicklung gibt es auch einige Herausforderungen im Umgang mit diesen. Da, wie bereits erwähnt, in Simulationen häufig mehrere Darstellungen miteinander kombiniert werden, liegt ein Teil der Herausforderungen im Bereich der Verwendung und dem Wechsel zwischen verschiedenen Darstellungen.

Ainsworth (2008) zählt einige der Herausforderungen im Umgang mit mehreren Darstellungen auf. Dazu gehört zunächst einmal das Verstehen und Interpretieren einzelner Darstellungen: „They [learners] must understand how a representation encodes and presents information“ (Ainsworth, 2008, S. 200). Empirische Untersuchungen zeigen, dass dies für Lernende häufig schwierig ist, insbesondere bei abstrakteren Darstellungen wie etwa Graphen (Leinhardt et al., 1990) oder chemischen Formeln (Taskin & Bernholt, 2014).

Eine weitere Herausforderung sieht Ainsworth (2008) darin, Darstellungen mit dem eigentlichen Thema zu verknüpfen. Ein Problem hierbei ist, dass dies eine gewisse Vertrautheit der Lernenden mit dem Thema voraussetzt. Diese Vertrautheit fehlt jedoch häufig bei Lernenden, da multiple Darstellungen meist zur Vermittlung eines neuen Themas eingesetzt werden (Ainsworth, 2008).

In diesem Zusammenhang zeigen Corradi et al. (2012) unter Bezugnahme zu mehreren Untersuchungen auf, dass Lernende mit einem geringen Vorwissen

- Schwierigkeiten im Umgang mit mehreren Darstellungen und dem Herstellen von Beziehungen zwischen diesen haben,
- Schwierigkeiten haben, relevante Informationen aus den Darstellungen zu entnehmen, und Darstellungen eher oberflächlich verarbeiten,
- sich eher auf symbolische Darstellungen wie etwa Formeln fokussieren und Informationen aus anderen Darstellungen ignorieren.

Eine besonders große Herausforderung sieht Ainsworth (2008) darin, verschiedene Darstellungen miteinander in Beziehung zu setzen. Auch hier gibt es eine Reihe an empirischen Befunden, die zeigen, dass Lernende Schwierigkeiten diesbezüglich haben. So stellen Lernende häufig nicht von alleine Beziehungen zwischen Darstellungen her oder verknüpfen eher oberflächliche Merkmale der Darstellungen miteinander (Ainsworth, 2008; Rey, 2011; Scheiter et al., 2020).

Neben den Herausforderungen im Umgang mit multiplen Darstellungen gibt es weitere Herausforderungen, die speziell im Umgang mit Simulationen oder allgemein mit interaktiven dynamischen Darstellungen auftreten können.

So können Simulationen bei Lernenden zu einer „Illusion of Understanding“ (Paik & Schraw, 2013, S. 280) führen. Dabei schätzen Lernende den Umgang mit Simulationen fälschlicherweise als zu leicht ein, wodurch sie weniger kognitive Ressourcen

für den Lernprozess zur Verfügung stellen (Paik & Schraw, 2013). Als eine Ursache für diese Fehleinschätzung wird die visuell ansprechendere Informationsdarbietung bei dynamischen im Vergleich zu statischen Darstellungen gesehen, sodass die Darstellungen „eher mit Unterhaltung als mit kognitiv anspruchsvollen Verarbeitungsprozessen assoziiert werden“ (Scheiter et al., 2020, S. 38). Dies kann zu einer oberflächlichen Bearbeitung der Simulation führen, „bei der kein klares Ziel verfolgt wird und das systematische Testen von Hypothesen ausbleibt“ (Zumbach, 2010, S. 57).

Im Gegensatz dazu kann es bei einigen Lernenden auch zu einer kognitiven Überlastung aufgrund der hohen Informationslast kommen. Lernende scheinen sich in solchen Fällen auf bestimmte Bereiche der Darstellung zu fokussieren, sodass dies zu einem mit dem Split-Attention-Effekt⁷ vergleichbaren Effekt führen kann (Lowe, 2004).

Gestaltungskriterien Zur Begegnung der genannten Herausforderungen werden in der Literatur eine Reihe an Kriterien zur Gestaltung von interaktiven dynamischen Darstellungen beschrieben (Plass et al., 2009; Wilzek, 2021). Viele dieser Kriterien überschneiden sich dabei mit den bereits präsentierten Kriterien zur Gestaltung multimedialer Lernmaterialien der CTML (siehe Abschnitt 3.3.3). Darüber hinaus sollen im Folgenden drei Kriterien vorgestellt werden, die speziell bei interaktiven dynamischen Darstellungen zu beachten sind:

- *Dynamic-Linking*: Aufgrund der Schwierigkeiten von Lernenden, Beziehungen zwischen verschiedenen Darstellungen herzustellen, wird empfohlen, diese Beziehungen durch das sogenannte *Dynamic-Linking* zu explizieren (Ainsworth, 1999). Dabei bewirkt eine Änderung der einen Darstellung automatisch entsprechende Änderungen der anderen Darstellungen (Zumbach, 2010). Ein Beispiel dafür wäre die automatische Anpassung eines Funktionsgraphen aufgrund von Änderungen der Funktionsgleichung. Mögliche Elemente zum dynamischen Verbinden sind Texteingaben, Schieberegler oder Drag-and-Drop Möglichkeiten. Letztere beiden erwiesen sich als lernwirksamer, vermutlich weil bei ihrer Bedienung der Split-Attention-Effekt

⁷Der Split-Attention-Effekt beschreibt das Phänomen, dass eine räumlich getrennte Darstellung von zusammengehörigen Informationen zu einer verringerten Lernleistung führt (Chandler & Sweller, 1992). Das räumliche Kontiguitätsprinzip (siehe Abschnitt 3.3.3) basiert auf dieser Erkenntnis.

nicht auftritt: Während beim Tippen die Aufmerksamkeit häufig zwischen Tastatur und Bildschirm wechseln muss, kann sie bei Schieberegler und Drag-and-Drop dauerhaft auf dem Bildschirm bleiben (Rey, 2011).

- *Interaktivität*: Es sollte auf ein angemessenes Maß an Interaktivität geachtet werden. So haben sich interaktive Elemente zur Steuerung der Darstellungsgeschwindigkeit (z. B. Start-Stopp-Buttons) und insbesondere Elemente zur Manipulation der dargestellten Inhalte (z. B. Schieberegler zur Veränderung von Variablen) als lernförderlich erwiesen (Plass et al., 2009). Als Ursachen hierfür werden die Reduktion der extrinsischen Belastung durch eine individuelle Anpassung der Darstellungsgeschwindigkeit sowie eine höhere lernbezogenen Belastung gesehen. Letztere resultiert aus einer gesteigerten intrinsischen Motivation, die ihrerseits durch die Manipulierbarkeit der Inhalte bedingt ist (Plass et al., 2009). Eine pauschal positive Wirkung von Interaktivität kann jedoch nicht vorhergesagt werden, da diese von weiteren Faktoren wie dem Vorwissen, dem Lernstil oder dem Lerngegenstand abhängig ist (Zumbach, 2010). Zudem kann ein zu hohes Maß an Interaktivität zu einer kognitiven Überlastung und damit zu einer Beeinträchtigung des Lernprozesses führen, insbesondere bei Lernenden mit wenig Vorwissen (Wilzek, 2021; Zumbach, 2010).
- *Unterstützung*: Um einer Überforderung oder einer oberflächlichen Bearbeitung entgegenzuwirken, sollten Lernende im Umgang mit Simulationen angemessen unterstützt werden (de Jong & Van Joolingen, 1998; Plass et al., 2009). Mögliche Unterstützungsmaßnahmen sind unter anderem das Anregen zum Aufstellen von Hypothesen, eine Reduktion möglicher Optionen innerhalb einer Simulation, Feedback zum individuellen Vorgehen und das zur Verfügung Stellen von inhaltlichen und lernstrategischen Hilfen (de Jong & Lazonder, 2014; de Jong & Van Joolingen, 1998; Plass et al., 2009).

3.5 Konkrete Modelle und Konzepte zur Vorstellungsentwicklung

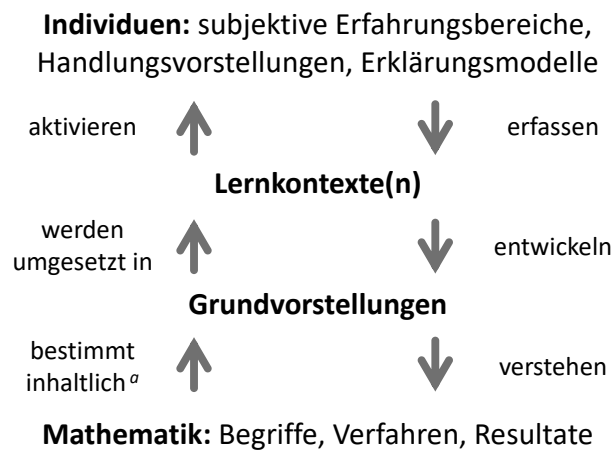
In der Literatur lassen sich einige konkrete Modelle oder Konzepte für den Unterricht finden, die eine Vorstellungsentwicklung in Richtung von Grundvorstellungen

anstreben und teils einige der bereits vorgestellten Strategien integrieren. Im Folgenden soll ein kurzer Überblick über die verschiedenen Ansätze gegeben werden.

Modell nach vom Hofe Ein erstes Modell zur Ausbildung von Grundvorstellungen entwickelte vom Hofe (1992). Dieses ist in Abbildung 3.1 dargestellt und basiert auf der konstruktivistischen Idee, dass Lernende Grundvorstellungen anhand von Lernkontexten und individueller Erfahrungen eigenständig entwickeln.

Abbildung 3.1

Modell zur Ausbildung von Grundvorstellungen



Anmerkung. In Anlehnung an vom Hofe und Roth (2023, S. 4).

^a Dies ist nicht als eindeutige Ableitung aus der Mathematik, sondern vielmehr als eine didaktische Entscheidung zu verstehen (vom Hofe, 1992).

Dazu konstruiert oder identifiziert die Lehrkraft einen geeigneten Lernkontext, der die Grundvorstellung „in einer dem Schüler gemäßen Art“ (vom Hofe, 1992, S. 359) repräsentiert und an individuelle Erfahrungen der Lernenden anknüpft. „Im günstigen Falle ist der Schüler in der Lage, die vom Lehrer intendierten Grundvorstellungen aus der Perspektive seiner Erfahrungsbereiche und Erklärungsmodelle zu erfassen, was langfristig dazu führen kann, daß der Schüler die intendierte Grundvorstellung aufbaut“ (vom Hofe, 1996b, S. 260).

Den Nutzen dieses Modells sehen vom Hofe und Blum (2016) unter anderem für die Gestaltung von Unterrichtsstunden, allerdings verbleibt das Modell auch in jüngeren Veröffentlichungen (vom Hofe & Roth, 2023) eher auf einer abstrakten Ebene ohne konkrete methodische oder didaktische Hinweise für die Unterrichtsgestaltung zu liefern.

Vorstellungsorientierter Unterricht Ein vergleichbares Modell entwickelten Lengnink et al. (2011). Dabei ergänzten sie den Prozess der Vorstellungsentwicklung dahingehend, dass das Ausbilden der Grundvorstellungen nicht ausschließlich auf Basis der Lernkontexte, sondern zusätzlich durch das Abgleichen der individuellen Vorstellungen mit den Grundvorstellungen im unterrichtlichen Diskurs stattfindet. Lengnink et al. (2011) geben dabei drei konkrete Schritte an, wie ein vorstellungsorientierter Unterricht nach diesem Modell aussehen kann:

1. *Individuelle Vorstellungen aktivieren und festhalten:* Anhand von lebensweltlichen oder innermathematischen Situationen aktivieren Lernende zunächst individuelle Vorstellungen. Da diese häufig unbewusst und flüchtig sind, sollten diese in irgendeiner Form festgehalten werden, damit sie für den weiteren Unterricht verfügbar sind.
2. *Individuelle Vorstellungen ressourcenorientiert analysieren:* Die Lehrkraft analysiert die individuellen Vorstellungen dahingehend, was die Lernenden bereits können und welche produktiven Anteile in scheinbar falschen Antworten stecken, um diese Erkenntnisse für den weiteren Lernprozess zu nutzen.
3. *Individuelle Vorstellungen reflektierend nutzen und im Sinne der Mathematik weiterentwickeln:* Auf Basis der vorherigen Analyse erfolgt nun die Weiterentwicklung der individuellen Vorstellungen in zwei unterschiedliche Richtungen. Bei der *vertikalen* Vorstellungsentwicklung werden die Grundvorstellungen „aus den Vorstellungen der Lernenden herausgeschält“ (Lengnink et al., 2011, S. 6). Dies umfasst folgende Tätigkeiten:
 - *Stabilisieren* tragfähiger Vorstellungen, indem sie als solche identifiziert und verstärkt werden
 - *Ausdifferenzieren* teilweise tragfähiger Vorstellungen durch die Erweiterung ihrer Geltungsbereiche, Verallgemeinerung oder Einschränkung, um sie in Einklang mit den Grundvorstellungen zu bringen

- *Umbauen* oder *Verwerfen* nicht tragfähiger Vorstellungen, indem ihre Untauglichkeit durch das Erzeugen kognitiver Konflikte verdeutlicht wird

Die *horizontale* Vorstellungsentwicklung zielt hingegen auf das situationsangemessene und reflektierte Aktivieren verschiedener Grundvorstellungen ab und umfasst folgende Tätigkeiten:

- *Ergänzen* des bestehenden Vorstellungsrepertoires durch die Aktivierung der Lernenden in geeigneten Kontexten
- *Situationsadäquates Aktivieren* von Vorstellungen durch kritische Reflexion und Gegenüberstellung, um die Geltungsbereiche und Einschränkungen bewusst zu machen und eine gezielte Nutzung zu ermöglichen

Vierphasenmodell Wartha und Schulz (2011) entwickelten ein Vierphasenmodell zum Aufbau von Grundvorstellungen. Dieses zielt auf das schrittweise Umbauen konkreter Handlungen am Material zu gedanklichen Operationen ab. Kern dabei ist die Verbalisierung der Handlungen.

In der ersten Phase handeln die Lernenden am konkreten Material und beschreiben dabei ihr Vorgehen (z. B. Addition und Subtraktion anhand eines Rechenrahmens). Anschließend beschreiben die Lernenden lediglich die Handlungen ohne sie selbst auszuführen – in der zweiten Phase mit und in der dritten Phase ohne Sicht auf das eigentliche Material. In der letzten Phase führen die Lernenden die Handlungen auf der symbolischen Ebene unter gelegentlichem Rückbezug zu den konkreten Materialhandlungen aus.

choice²learn Ein Konzept zur Vorstellungsentwicklung im Bereich naturwissenschaftlicher Phänomene ist das von Marohn (2008) entwickelte Konzept *choice²-learn*. Der grundlegende Ansatz zur Vorstellungsentwicklung dieses Konzepts ist das Auslösen kognitiver und sozio-kognitiver Konflikte durch die Bearbeitung geeigneter Lernimpulse in Kleingruppen. Das Konzept gliedert sich in die folgenden fünf Unterrichtsphasen (Marohn, 2021):

1. *Beobachte*: Lernende beobachten ein alltägliches Phänomen (z. B. Lösen einer Brausetablette), aus dem sich eine Fragestellung ergibt.
2. *Vermute*: Mithilfe eines Concept Cartoons werden verschiedene alternative Vorstellungen sowie die fachlich anerkannte Vorstellung präsentiert, zu denen sich die Lernenden in Einzelarbeit positionieren.
3. *Prüfe*: In Kleingruppen bearbeiten die Lernenden verschiedene Lernimpulse in Form von (Gedanken-)Experimenten und überprüfen für jede der Vorstellungen, inwiefern die Erkenntnisse aus dem Lernimpuls für oder gegen die jeweiligen Vorstellungen sprechen.
4. *Erkläre*: Im Plenum werden die Ergebnisse der vorherigen Phase vorgestellt, offene Fragen geklärt und ggf. mithilfe von Anschauungsmodellen erklärt sowie die fachlich anerkannte Vorstellung gesichert.
5. *Wende an*: Die Erkenntnisse der vorherigen Phase werden in einem anderen Kontext angewendet und vertieft.

Zu dem Konzept wurden konkrete Materialien zu verschiedenen Themen entwickelt und die Wirksamkeit in zahlreichen Untersuchungen gezeigt (Marohn, 2021).

KOSIMA-Unterrichtskonzept In dem langjährigen Forschungs- und Entwicklungsprojekt KOSIMA wurde ein Strukturierungsmodell zur Rahmung für den Mathematikunterricht entwickelt und in der Schulbuchreihe *mathewerkstatt* verwirklicht. Das Modell integriert neben weiteren didaktischen Prinzipien das genetische Prinzip und verfolgt unter anderem das Ziel, Grundvorstellungen und prozessbezogene Kompetenzen zu fördern (Neumann et al., 2017).⁸

In dem Modell wird zwischen vier sogenannten *Kernprozessen* unterschieden, die einer Unterscheidung von Unterrichtssituationen sowie der Entwicklung von Lehr-Lernarrangements dienen (Prediger et al., 2013):

Im Kernprozess *Anknüpfen* geht es zunächst darum, die Lernenden an den Kontext, das Problem und die Kernfrage (siehe Abschnitt 3.3.2) heranzuführen, anhand derer dann im weiteren Verlauf die genetische Erarbeitung der mathematischen Begriffe und Zusammenhänge erfolgt. Die Lernenden aktivieren in dem Kernprozess

⁸Neumann et al. (2017) verwenden die Bezeichnung *inhaltliche Vorstellungen*, in einer anderen Veröffentlichung einer Mitautorin erfolgt jedoch eine Gleichsetzung mit dem Begriff der Grundvorstellungen (Prediger, 2009).

ihr Vorwissen, werfen Fragen auf und äußern erste Intuitionen. Dies dient zum einen der Vorausorientierung für Lernende und zum anderen der Diagnose von Vorwissen für Lehrende (Prediger et al., 2013). In der *mathewerkstatt* wird der Kernprozess mithilfe eines Cartoons realisiert, der eine Alltagssituation darstellt und ein Problem andeutet, das bei Lernenden Fragen aufwirft und sie an die Kernfrage heranführt (Prediger et al., 2014; Prediger et al., 2013).

Im Kernprozess des *Erkundens* geht es um das eigenständige Nacherfinden und Entdecken von mathematischen Begriffen und Zusammenhängen auf Basis individueller Vorerfahrungen ganz im Sinne des genetischen Prinzips (Prediger et al., 2014). Dieser Prozess wird durch die Kernfragen strukturiert, die mit den nachgefundenen Begriffen und Zusammenhängen beantwortet werden können (Barzel et al., 2011). In der *mathewerkstatt* werden dazu Aufgaben formuliert, in denen die Lernenden „Probleme lösen, Muster untersuchen, mit Vermutungen und Beispielen experimentieren, Phänomene versuchen zu verstehen usw.“ (Prediger et al., 2014, S. 87). Dieser Kernprozess ist geprägt durch Offenheit, Kreativität und kooperativen Austausch.

Im Kernprozess des *Ordnen*s werden die zuvor individuell gesammelten Erkenntnisse systematisiert, mit der regulären Mathematik verknüpft und gesichert. Dies erfolgt anhand der folgenden vier Tätigkeiten (Barzel et al., 2012; Prediger et al., 2014):

1. *Reflektieren*: Das individuell Erkundete wird reflektiert und den Lernenden bewusst gemacht.
2. *Regularisieren*: Das individuell Erkundete wird mit der regulären Mathematik abgeglichen und so eine gemeinsame Wissens- und Sprachbasis geschaffen.
3. *Vernetzen*: Gegebenenfalls fragmentiertes Wissen wird miteinander in Beziehung gesetzt und vernetzt.
4. *Dokumentieren*: Das Gelernte wird schriftlich festgehalten und so ein späteres Zurückgreifen darauf ermöglicht.

In der *mathewerkstatt* wird der Kernprozess des Ordnen mit Hilfe von *Aneignungsaufgaben* realisiert. Diese dienen der Initiierung der zuvor genannten Tätigkeiten „und zwar unter möglichst aktiver Beteiligung der Lernenden bei gleichzeitiger Gewährleistung von Konvergenz“ (Prediger et al., 2014, S. 89). Die aktive Beeilung

und der Grad der Konvergenz sind dabei gegenläufig und müssen daher gegeneinander abgewogen werden. Soll beispielsweise die Definition eines mathematischen Begriffs dokumentiert werden stellen das alleinige Finden einer Definition, das Ergänzen oder Abwandeln einer fertigen Formulierung und das Nachvollziehen einer fertigen Formulierung mögliche Aneignungsaufgaben dar. Während die aktive Beteiligung von der ersten zur letzten Aufgabe abnimmt, nimmt der Grad der Konvergenz zu (Prediger et al., 2011).

Im Kernprozess des *Vertiefens* geht es um das Festigen sowie den Transfer des zuvor erworbenen Wissens. In der *mathewerkstatt* wird dies insbesondere durch Übungsaufgaben realisiert, die die Kriterien des *intelligenten Übens* erfüllen (Leuders, 2014). Zu den Kriterien gehören (Leuders, 2009):

1. *Sinnstiftung*: Den Lernenden wird der Nutzen der jeweiligen Übungen transparent gemacht.
2. *Entdeckungsoffenheit*: Die Aufgaben gehen über das reine Einüben von Automatismen hinaus und bieten den Lernenden Möglichkeiten für individuelle Lösungswege und Entdeckungen.
3. *Selbstdifferenzierung*: Die Aufgaben sind sowohl für stärkere als auch schwächere Lernende geeignet.
4. *Reflexivität*: Die Aufgaben regen die Lernenden zum Nachdenken über den Lerngegenstand oder die Übungstätigkeit an.

Fazit Insgesamt wurden in diesem Abschnitt verschiedene Konzepte und Modelle zur Vorstellungsentwicklung präsentiert. Diese unterscheiden sich dabei insbesondere in ihrer Konkretheit und ihrer Schwerpunktsetzung.

So kann das Modell nach vom Hofe (1992) eher als ein abstrakteres Modell betrachtet werden, dass allgemein den Prozess des Ausbildens von Grundvorstellungen durch geeignete Lernkontexte beschreibt, ohne konkrete Hinweise zur Gestaltung der Lernkontexte und des Unterrichts zu liefern.

Der vorstellungsorientierte Unterricht nach Lengnink et al. (2011) hingegen hebt die vielfältigen Möglichkeiten zur aktiven Vorstellungsentwicklung im unterrichtlichen Diskurs hervor, indem verschiedene Tätigkeiten zur horizontalen und vertikalen Vorstellungsentwicklung beschrieben werden. Insgesamt verbleibt jedoch

auch dieses Modell aufgrund fehlender Materialbeispiele und Unterrichtsphasen eher auf einer allgemeineren Ebene, trotz einiger Hinweise zur methodischen Umsetzung der jeweiligen Tätigkeiten.

Das Vierphasenmodell von Wartha und Schulz (2011) betont die Wichtigkeit der Verbalisierung von Handlungen zum Aufbau von Grundvorstellungen und liefert mit den vier Phasen eine konkrete Anweisung zur schrittweisen Verinnerlichung der Handlungen. Die Phasierung scheint allerdings eher auf die Strukturierung einer Lernaktivität statt einer Unterrichtsstunde abzielen. Zudem ist eine Umsetzung dieses Modells für weniger handlungsbezogene Grundvorstellungen fraglich.

Eine konkrete Phasierung sowie ausgestaltete Materialien für einen vorstellungsorientierten Unterricht bieten choice²learn (Marohn, 2008) und das KOSIMA-Unterrichtskonzept (Prediger et al., 2013). Ersteres legt dabei den Fokus auf kognitive und sozio-kognitive Konflikte, Letzteres auf das genetische Lernen. Zudem wurden beide Konzepte empirisch untersucht. Für die konkrete Gestaltung eines vorstellungsorientierten Unterrichts erweisen sich somit insbesondere diese beiden Konzepte als eine geeignete Grundlage.

Teil III

Methodischer Rahmen

4 Design-Based Research

In diesem Kapitel erfolgt die Darstellung des Design-Based Research (DBR)-Ansatzes, an dem sich die vorliegende Arbeit orientiert.

Der DBR-Ansatz ist ein methodischer Forschungsrahmen für die theoriegeleitete Entwicklung praxistauglicher Interventionen, deren Analyse gleichzeitig wichtige Beiträge zu Theorieentwicklung liefern. Dadurch kann der Ansatz das Verkleinern der häufig beklagten Kluft zwischen Bildungspraxis und fachdidaktischer Forschung unterstützen (Prediger et al., 2012).

Der Ursprung dieses Ansatzes wird häufig auf die Arbeiten von Brown (1992) und Collins (1992) zurückgeführt. Collins (1992) forderte als erster, dass didaktische Forschung, ähnlich zur Technologieforschung, eine Designforschung sein müsste, welche die Auswirkungen designer Lernumgebungen auf Lernprozesse untersucht. Dies setzte Brown (1992) um, indem sie innovative Lernumgebung entwickelte und in der Schulpraxis erprobte. Seitdem entwickelten sich verschiedenste Bezeichnungen für diese Forschungsrichtung, wie etwa *design-research* oder *development research* im internationalen (T. Anderson & Shattuck, 2012) und *Entwicklungsforschung* (Prediger et al., 2012) im deutschsprachigen Raum, die unter dem vom Design-Based-Research-Collective geprägten Begriff *Design-Based Research* zusammengefasst werden können.

Im Folgenden wird der DBR-Ansatz im Detail vorgestellt. Dazu werden zunächst Gütekriterien vorgestellt, die einen Einblick in die typischen Charakteristika des Ansatzes geben. Anschließend wird ein idealtypischer Verlauf design-basierter Forschungsprojekte vorgestellt, an welchem sich die vorliegende Arbeit orientiert. Zuletzt wird auf die Herausforderungen von DBR-Projekten eingegangen.

4.1 Gütekriterien

Design-basierte Forschungsprojekte können sich hinsichtlich ihrer theoretischen und praktischen Beiträge (L. Rott & Marohn, 2016) oder ihres Forschungssettings (Cobb et al., 2003) deutlich unterscheiden. Dennoch lassen sich gemeinsame Merkmale identifizieren, die in der Literatur beschrieben werden (T. Anderson & Shattuck, 2012; Cobb et al., 2003; McKenney & Reeves, 2012) und zur Charakterisierung design-basierter Forschung geeignet sind.

Im Arbeitskreis unter Leitung von Prof. Dr. Annette Marohn wurden auf Basis dieser Merkmale Gütekriterien in einem internen Arbeitspapier entwickelt, die als Leitlinie für DBR-Projekte und zur Sicherung ihrer wissenschaftlichen Qualität dienen.

Im Folgenden werden diese Gütekriterien vorgestellt, da sie nicht nur der Qualitätssicherung dienen, sondern auch die zentralen Charakteristika des DBR-Ansatzes zusammenfassen und damit einen Überblick über design-basierte Forschung bieten.

Relevanz DBR-Projekte gehen von einem konkreten Problem in der Bildungspraxis aus und entwickeln innovative Lösungen, wobei sowohl praktisch anwendbare Interventionen als auch theoretische Erkenntnisse zugleich angestrebt werden (Reinmann, 2022b). Zu Beginn eines DBR-Projekts ist es somit zunächst einmal notwendig, ein geeignetes und relevantes Problem zu identifizieren.

Nach McKenney und Reeves (2012) ist es dabei wichtig, dass dieses sowohl aus praktischer als auch aus theoretischer Perspektive relevant ist.

Aus theoretischer Sicht sollte das Problem eine klar erkennbare Forschungslücke adressieren (legitimate), mit vorhandenen Methoden bearbeitbar sein (researchable) und einen Beitrag zur Weiterentwicklung von Theorie oder wissenschaftlichem Verständnis zu einem breiter anerkannten Thema leisten (research-worthy) (McKenney & Reeves, 2012).

Aus praktischer Sicht muss das Problem tatsächlich in der Praxis bestehen (legitimate), in realen Kontexten identifizierbar und untersuchbar sein (researchable) und zudem eine solche Relevanz besitzen, dass Personen aus der Bildungspraxis bereit sind, in dessen Lösung zu investieren (research-worthy) (McKenney & Reeves, 2012).

Praxisbezug DBR-Projekte zielen darauf ab, für die Bildungspraxis geeignete und umsetzbare Interventionen zu entwickeln (T. Anderson & Shattuck, 2012; Brown, 1992; Reinmann, 2022b). Um diesem Anspruch gerecht zu werden, ist es wesentlich, dass DBR-Projekte einen starken Bezug zur Praxis aufweisen. Dieser kann in vielerlei Hinsicht hergestellt werden.

So stellt bereits das zuvor beschriebene Aufgreifen eines relevanten Problems aus der Bildungspraxis einen Praxisbezug dar.

Des Weiteren sollten entwickelte Interventionen in DBR-Projekten nicht in Labor-situationen, sondern in (quasi-)realen Bildungssituationen erprobt und für die Bildungspraxis optimiert werden (Brown, 1992; Collins et al., 2004). Dazu ist eine enge Zusammenarbeit mit Personen aus der Praxis während des gesamten Projektverlaufs notwendig (T. Anderson & Shattuck, 2012). Dies umfasst Lehrkräfte sowie weitere beteiligte Gruppen, wie beispielsweise professionelle Entwicklerinnen und Entwickler oder die intendierte Zielgruppe. Hierbei kann die Kooperation zu verschiedenen Zeitpunkten und in unterschiedlicher Intensität erfolgen, etwa durch die Identifikation von Problembereichen am Projektbeginn, durch das Einholen von Feedback und aktive Mitgestaltung während der Entwicklungsphasen oder durch die Evaluation und Implementation der Interventionen mittels Lehrkräfteworkshops in der Endphase (T. Anderson & Shattuck, 2012; Collins, 1992; McKenney & Reeves, 2012).

Bei der Kooperation mit Lehrkräften sollte bedacht werden, dass diese zeitlich sehr beansprucht sind. Deshalb sollte die Intervention den Lehrkräften konkrete Materialien zur Verfügung stellen, sodass sie diese nicht selbst auf Basis grober Vorschläge entwickeln müssen. Dabei sollte kommuniziert werden, welche Interventionsmaßnahmen ein unverbindliches Angebot darstellen und welche Maßnahmen den Kern der Intervention widerspiegeln und daher von Lehrkräften befolgt werden sollten (Wilhelm & Hopf, 2014).

Designprinzipienorientierung Ein weiteres Kriterium für DBR-Projekte ist, dass die Entwicklung der Intervention nicht willkürlich geschieht sondern sich an zuvor formulierten *Designprinzipien* orientiert.

Dabei handelt es sich um Leitlinien für die Gestaltung der Intervention, die theoretisch, empirisch oder plausibel begründet sind. Sie sind darauf ausgerichtet, zur

Lösung des Problems aus der Bildungspraxis bzw. zur Erreichung des angestrebten Ziels beizutragen (Euler, 2017).

Die Designprinzipien können sich in ihrem Abstraktionsgrad unterscheiden (Euler & Sloane, 2014b) und werden durch verschiedene *Designelemente* konkretisiert, die zur Verwirklichung der Designprinzipien in einem spezifischen Kontext dienen: „The design principle in its complete structure provides the theoretical background for the functioning of the design: The design elements are practical tools for its realization“ (Prediger, 2019, S. 12).

Weitere aus der Literatur abgeleitete Gestaltungskriterien können die Gestaltung der Designelemente unterstützen, stehen aber nicht selbst im Zentrum der Forschung.

Die Orientierung an Designprinzipien kann sich in allen Phasen eines DBR-Projekts zeigen (Althoff et al., 2025; Feulner et al., 2021):

- Zu Beginn werden Designprinzipien theoretisch hergeleitet und formuliert.
- Während der Entwicklung wird erläutert, wie konkrete Designelemente diese Prinzipien im spezifischen Kontext umsetzen.
- Bei der Evaluation wird überprüft, inwiefern die Designprinzipien und -elemente wirken, zum Beispiel indem Erhebungsinstrumente (wie Fragebögen oder Interviews) gezielt auf sie Bezug nehmen oder im Rahmen der Ergebnisanalyse die Funktionsweisen rekonstruiert werden.
- Im theoretischen Output können die gesammelten Erfahrungen dazu beitragen, die Designprinzipien zu bestätigen, zu modifizieren oder zu verwerfen, und leisten so einen Beitrag zur Weiterentwicklung von Theorien.

Theoriebezug Nicht nur der Praxis, sondern auch der Theorie misst der DBR-Ansatz eine wichtige Bedeutung bei. Deshalb ist der gesamte Verlauf design-basierter Projekte theoriebasiert: Von der Entwicklung der Intervention über ihre Erprobung in der Praxis bis hin zu ihrer Reflexion und Überarbeitung wird der Bezug zur Theorie gefordert. Ziel dieses Vorgehens ist es – neben dem Entwickeln einer praxistauglichen Intervention – einen Beitrag zur Theorieentwicklung zu leisten (Reinmann, 2022b; L. Rott & Marohn, 2016).

Der enge Theoriebezug zeigt sich im gesamten Projektverlauf (Euler & Sloane, 2014a; Reinmann, 2022b):

- Bereits in der frühen Phase können grundlegende Ideen für das Design und Designprinzipien aus bestehenden theoretischen Erkenntnissen oder deren Kombination abgeleitet werden.
- Bei der Ausarbeitung und Konkretisierung der Designelemente können weitere theoretisch fundierte Gestaltungskriterien herangezogen werden.
- Die Evaluation der entwickelten Intervention erfolgt vor dem Hintergrund bestehender Theorien. So werden empirische Ergebnisse theoriebezogen interpretiert und eingeordnet. Zudem können dadurch bestehende Theorien validiert, angepasst, erweitert oder neue Hypothesen abgeleitet werden.

Designangemessenheit Ein weiteres Gütekriterium von DBR-Projekten ist die Designangemessenheit: Das entwickelte Design sollte geeignet sein, das zu Beginn identifizierte Problem zu lösen bzw. das angestrebte Ziel tatsächlich zu erreichen. Die Angemessenheit des Designs sollte dabei sowohl auf theoretischer als auch auf empirischer Ebene beurteilt werden:

1. *Theoretisch-argumentative Plausibilität:* Das Design sollte sich aus einer schlüssigen Zusammenführung theoretischer Überlegungen, empirischer Erkenntnisse und der spezifischen Problemlage in der Praxis ableiten lassen. Sämtliche Designentscheidungen sind nachvollziehbar zu begründen und mit theoretischen bzw. empirischen Bezügen auszuweisen (Collins, 1992; Plomb, 2013).
2. *Empirische Wirksamkeit des Gesamtdesigns:* Das Design gilt als angemessen, wenn es in der Praxis nachweislich wirksam ist – also im Zusammenspiel der Designprinzipien und -elemente das adressierte Problem tatsächlich bearbeitet. Üblicherweise wird dies mithilfe von Prä-/Post-Tests überprüft (Plomb, 2013).
3. *Empirische Wirksamkeit einzelner Designelemente:* Über die Gesamtwirkung hinaus ist auch die Funktionalität einzelner Designelemente zu untersuchen

und inwiefern diese zur Verwirklichung der Designprinzipien beitragen (Prediger, 2019; Wessel, 2015). Hierzu können verschiedene Methoden genutzt werden, wie etwa:

- die Analyse von Lernprodukten (Artefakten) der Teilnehmenden,
- die Beobachtung und Analyse von Lernprozessen (z. B. durch Videos),
- gezielte Befragungen der Zielgruppe nach einzelnen Interventionselementen (z. B. durch Interviews oder Fragebögen nach Post-Tests).

Iterativität Ein Ziel des DBR-Ansatzes besteht darin, eine funktionierende Intervention für die Bildungspraxis zu entwickeln. Dazu wird eine Intervention theoriebasiert entwickelt, in der Praxis erprobt und anschließend analysiert und angepasst. Die angepasste Intervention gilt es nun erneut in der Praxis zu erproben und gegebenenfalls anzupassen. Dieser iterative Prozess bestehend aus verschiedenen Phasen bildet das Kernstück des DBR-Ansatzes (McKenney & Reeves, 2012; L. Rott & Marohn, 2016) und wird in Abschnitt 4.2 im Detail vorgestellt.

Die Iterativität zeigt sich jedoch nicht nur bei der Entwicklung und Erforschung der Intervention, sondern kann auch bei der Entwicklung und Optimierung von Testinstrumenten, Kodierleitfäden oder theoretischer Grundlagenarbeit (z. B. Auswahl und Kategorisierung von Fehlschlüssen van den Boom, 2022) eine Rolle spielen.

Multiperspektivität Ein weiteres Gütekriterium ist die Multiperspektivität. Darunter ist das Einnehmen und Verknüpfen verschiedener Perspektiven sowohl bei der Entwicklung als auch bei der Evaluation der Intervention zu verstehen.

Multiperspektivität bezieht sich einerseits auf Wissensvielfalt: DBR sollte „in Theorie, Empirie und Design vielfältige Wissensquellen heranziehen, dabei unterschiedliche Wissensarten berücksichtigen und zueinander in Beziehung setzen“ (Reinmann, 2022b, S. 13). Gegebenenfalls kann es notwendig sein, den Rat von Expertinnen und Experten aus verschiedenen Fachdisziplinen einzuholen (McKenney & Reeves, 2012).

Andererseits erfordert Multiperspektivität auch eine Methodenvielfalt. Da DBR-Projekte in realen Bildungssituationen stattfinden, treten zahlreiche, nur begrenzt kontrollierbare Einflussvariablen auf (Collins et al., 2004). Ziel ist daher nicht der

Nachweis des Einflusses einzelner Variablen, sondern das Verständnis für die Funktionsweise verschiedener Designelemente und die kontinuierliche Optimierung der Intervention. Um der Komplexität gerecht zu werden, sollten verschiedene quantitative und qualitative Untersuchungs- und Auswertungsmethoden eingesetzt, miteinander kombiniert oder trianguliert werden (Collins et al., 2004).

Innovation Innovation ist ein weiteres Gütekriterium von DBR-Projekten. Darunter wird die Umsetzung einer neuartigen Idee verstanden, die zu einer erkennbaren Veränderung führt und einen konkreten Nutzen hat (Reinmann, 2005). Im Bildungsbereich sind damit in der Regel keine radikalen, sondern oft eher kleinschrittige, aber dennoch bedeutsame Veränderungen gemeint (Reinmann, 2005).

Eine Innovation zeigt sich nicht zwingend bereits im Ansatz oder zu Beginn des Projekts, sondern kann sich auch erst im weiteren Verlauf herausbilden und sich verschieden äußern. Beispiele für Innovationen in DBR-Projekten sind etwa:

- das Anwenden oder Kombinieren neuer Technologien (z. B. Künstliche Intelligenz), Methoden oder pädagogisch-didaktischer Ansätze, woraus innovative Designprinzipien entstehen,
- das Integrieren bislang wenig beachteter (inhaltlicher) Aspekte und Kompetenzen in Schule oder Lehramtsausbildung (z. B. Bewertungskompetenz, kritisches Denken oder der Einsatz von Videovignetten),
- die Übertragung und Implementation bereits existierender Innovationen in neue Bildungskontexte (z. B. Escape Games in der Schule Engstler & Marohn, 2025).

Theoretischer und praktischer Output Ein zentrales Gütekriterium von DBR-Projekten ist der doppelte Output: Sie zielen sowohl auf theoretische als auch auf praktische Ergebnisse ab (Reinmann, 2022b; L. Rott & Marohn, 2016). Die Gewichtung und die Art der Ergebnisse kann je nach Projekt variieren, jedoch sind beide Perspektiven grundlegend.

Der praktische Output eines Projekts entspricht der entwickelten Intervention, die sowohl praxistauglich als auch wirksam sein sollte (Plomb et al., 2013).

Der theoretische Output umfasst neue oder weiterentwickelte Theorien, die sich aus der Entwicklung, Erprobung und Analyse des Designs ergeben. Dabei handelt es sich zunächst um lokale, kontextspezifische Theorien, die durch Übertragung auf andere Kontexte in weiteren DBR-Projekten an Reichweite gewinnen können (Prediger, 2019). Nach McKenney und Reeves (2012) lassen sich verschiedene Arten von Theorien unterscheiden:

- *Deskriptive Theorien* beschreiben Phänomene,
- *Erklärende Theorien* setzen Konzepte zueinander in Beziehung und erklären Zusammenhänge,
- *Prädiktive Theorien* ermöglichen Vorhersagen zu bestimmten Effekten,
- *Präskriptive Theorien* (wie Designprinzipien) kombinieren diese Aspekte und geben handlungsleitende Empfehlungen für die Gestaltung von Designs.

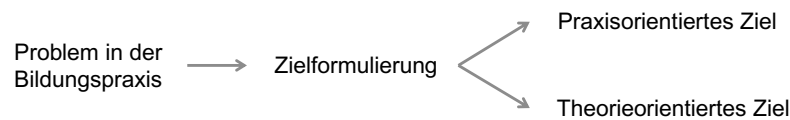
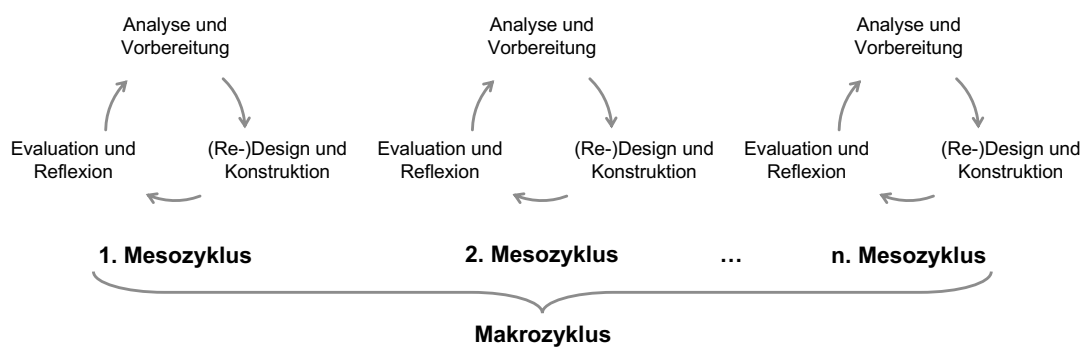
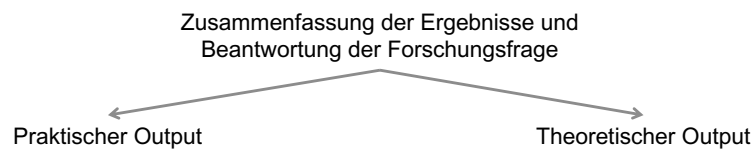
Der doppelte Output sollte nachvollziehbar und empirisch fundiert aus dem Projektverlauf hervorgehen (Euler & Sloane, 2014a; McKenney & Reeves, 2012). Zudem sollte eine Verbreitung der Ergebnisse durch Publikationen, Vorträge oder Fortbildungen sowohl an die wissenschaftliche Community als auch an die Bildungspraxis angestrebt werden.

4.2 Verlauf

Der Verlauf von DBR-Projekten ist keineswegs einheitlich, sondern kann je nach Projekt, Forschenden oder Disziplin variieren (L. Rott & Marohn, 2016). Dennoch lässt sich auf der Basis struktureller Gemeinsamkeiten verschiedener Forschungsprojekte ein idealtypisches Strukturmodell für den DBR-Ansatz beschreiben. Ein solches Modell wurde von Rohrbach-Lochner (2019) unter Berücksichtigung bereits bestehender Strukturmodelle entwickelt und ist Grundlage mehrerer Forschungsprojekte (z. B. Dellbrügge, 2020; Haas, 2021; Kolbeck, 2019; Kralisch, 2022; van den Boom, 2022). Es soll daher auch zur Strukturierung des vorliegenden Projekts dienen und wird im Folgenden vorgestellt. Eine Übersicht des Modells ist in Abbildung 4.1 dargestellt.

Abbildung 4.1

Strukturmodell zur Beschreibung eines idealtypischen Verlaufs von DBR-Projekten

Framing**Design-Experiment****Re-Framing**

Anmerkung. In Anlehnung an Rohrbach-Lochner (2019, S. 31).

4.2.1 Framing

Den Beginn eines DBR-Projekts bildet eine *Problemstellung*, die sich sowohl aus der Bildungspraxis, als auch aus der Literatur ergeben kann. Eine Lösung für dieses Problem wird in dem vorbereitenden Schritt des *Framings* vorstrukturiert (Reinmann, 2014). Dazu gehört eine ausführliche *Literaturrecherche* zu relevanten Bereichen des Problems, um eine fundierte Grundlage für die Problemlösung zu schaffen (Cobb et al., 2003). Das Sichten relevanter Literatur ist damit keineswegs abgeschlossen, sondern wird im Verlauf des Projekts vertieft oder durch weitere Bereiche ergänzt. Die Ergebnisdarstellung der Recherche in einer DBR-Arbeit ist als

Überblick zu verstehen und erhebt deshalb keinen Anspruch auf Vollständigkeit (Rohrbach-Lochner, 2019).

Weiterhin wird bereits im Framing der angestrebte praktische sowie theoretische Output von DBR-Projekten fokussiert, indem *Ziele* für beide Outputformen formuliert werden. Beispielsweise kann ein praxisorientiertes Ziel die Entwicklung von Unterrichtsmaterialien und ein theorieorientiertes Ziel die Herleitung oder Weiterentwicklung von Theorien zu den Gelingensbedingungen dieser Materialien sein (L. Rott, 2018).

Abschließend ist anzumerken, dass die im Framing geschaffene Vorstruktur eines DBR-Projekts keineswegs als festgelegt zu betrachten ist, sondern sich im Verlauf des Projekts begründet verändern kann (Reinmann, 2014).

4.2.2 Design-Experiment

Im Anschluss an das Framing findet das *Design-Experiment* statt. Im Fokus dieses Schrittes steht das Designen einer Intervention zur Lösung der übergeordneten Problemstellung sowie dessen stetige Weiterentwicklung mithilfe von Erprobungen (Gravemeijer & Cobb, 2006).

Zur Strukturierung des Design-Experiments eignet sich die Einteilung in Makro-, Meso- und Mikrozyklen nach McKenney und Reeves (2012). Ein *Makrozyklus* umfasst das gesamte Design-Experiment und geht der übergeordneten Fragestellung nach. Ein Makrozyklus setzt sich aus mehreren *Mesozyklen* zusammen, die sich jeweils durch eigene Fragestellungen und Ziele voneinander abgrenzen (L. Rott & Marohn, 2016). Die übergeordnete Fragestellung wird dadurch in mehrere Teilfragestellungen zerlegt. Jeder Mesozyklus unterteilt sich wiederum in verschiedene Phasen, den sogenannten *Mikrozyklen*, die im Folgenden beschrieben werden (McKenney & Reeves, 2012; Rohrbach-Lochner, 2019):

Analyse und Vorbereitung In dieser Phase werden die Fragestellungen und Ziele des jeweiligen Mesozyklusses formuliert. Anfangs orientieren sich diese stark an der übergeordneten Forschungsfrage, werden jedoch im Laufe des Projekts durch Evaluation und Reflexion der vorherigen Zyklus-Ergebnisse verfeinert. Weiterhin kann in dieser Phase die im Framing durchgeführte Literaturrecherche zu grundlegenden Themen spezifiziert und ergänzt werden, falls die jeweiligen Fragestel-

lungen und Ziele dies erfordern. Zudem sollten die Rahmenbedingungen der Intervention analysiert und festgelegt werden, wie zum Beispiel Lernort und -gruppe (McKenney & Reeves, 2012; Rohrbach-Lochner, 2019).

(Re-)Design und Konstruktion In dieser Phase findet die eigentliche Entwicklung der Intervention zur Lösung der Problemstellung statt. Während des *Designs* werden verschiedene Lösungsideen generiert, bewertet und gegeneinander abgewogen – basierend auf empirischen und theoretischen Grundlagen sowie den persönlichen Erfahrungen und Intuitionen der Forschenden. Diese Ideen münden in konkreten Designkriterien, die bei der tatsächlichen *Konstruktion* zu berücksichtigen sind. Der Output der Konstruktionsphase besteht in der Darstellung der Lösung, entweder in physischer Form, beispielsweise als Lernmaterialien, oder in indirekter Form, wie Richtlinien für ein Unterrichtskonzept. Zu Beginn des Projekts handelt es sich bei dem Output meist um Prototypen, die sich im weiteren Verlauf iterativ durch stetiges *Re-Design* auf empirischer Basis zu funktionalen Interventionen entwickeln (McKenney & Reeves, 2012).

Insgesamt ist das Design und die Konstruktion durch analytische, aber auch kreative Prozesse seitens der Forschenden geprägt. Daher ist es von entscheidender Bedeutung, diese Prozesse ausführlich zu dokumentieren, um sie für andere Forschende transparent zu gestalten (McKenney & Reeves, 2012).

Evaluation und Reflexion In dieser Phase findet die *Evaluation* der Intervention mittels empirischer Tests statt. Die Art der Tests wird dabei maßgeblich von dem aktuellen Entwicklungsstand der Intervention bestimmt. McKenney und Reeves (2012) unterscheiden hier zwischen drei Testarten, die sich durch unterschiedliche Forschungsfoki voneinander abgrenzen:

- *Alpha-Tests*: Bei den Alpha-Tests soll die Umsetzbarkeit und Schlüssigkeit der Designideen, beziehungsweise deren konkrete Ausgestaltung in Form eines Prototyps, überprüft werden. Im Vordergrund stehen dabei Fragestellungen wie zum Beispiel „Inwieweit sind die Designideen im Prototypen gut umgesetzt?“ oder „Welche Anpassungen der Ideen oder des Prototyps könnten die Umsetzbarkeit und die Erfolgsaussichten der geplanten Ziele verbessern?“. Geeignete Strategien zur Beantwortung dieser Fragen sind insbesondere das

Entwickler-Screening, die *Expertinnen- und Expertenreview* oder erste *Pilotierungen*.

- *Beta-Tests*: Während der Beta-Tests wird die beabsichtigte Funktionalität einer Intervention in der Praxis sowie deren Integration in die jeweilige Bildungsinstitution überprüft. Der Fokus liegt auf Fragestellungen wie zum Beispiel „Welche beabsichtigten und unbeabsichtigten Prozesse löst die Intervention aus?“ und „Wie sinnvoll und nützlich empfinden Lehrkräfte die Intervention?“. Diese Fragen werden häufig mithilfe von Pilotierungen oder sogenannten *Tryouts* beantwortet, bei denen die Intervention im beabsichtigten Lernsetting erprobt wird.
- *Gamma-Tests*: Bei den Gamma-Tests wird die Effektivität und der Output einer finalen oder nahezu fertigen Intervention untersucht. Typische Fragestellungen sind unter anderem „Inwieweit und unter welchen Bedingungen löst die Intervention das Problem?“ und „Inwieweit lassen sich die förderliche Bedingungen in repräsentativen Klassenräumen umsetzen?“. Diese Fragen lassen sich nahezu ausschließlich mithilfe von *Tryouts* beantworten.

Im Anschluss an die Evaluation findet die *Reflektion* der Ergebnisse unter Berücksichtigung der Forschungsfrage des entsprechenden Mesozyklusses sowie der übergeordneten Problemstellung statt (Rohrbach-Lochner, 2019). Dies kann sowohl zur Anpassung der Intervention führen, als auch zu einem tieferen theoretischen Verständnis beitragen (McKenney & Reeves, 2012).

4.2.3 Re-Framing

In dem letzten Schritt des DBR-Ansatzes, dem *Re-Framing*, werden die Ergebnisse aller Mesozyklen zusammengetragen und interpretiert, um die übergeordnete Fragestellung zu beantworten.

Weiterhin werden der praktische und theoretische Output der Intervention in den Blick genommen:

Inwieweit wurde eine wirksame Intervention zur Lösung des Problems entwickelt? Welche Elemente der Intervention haben sich als gewinnbringend herausgestellt und in welchem Bezug stehen sie zu bereits bestehenden Theorien? Inwieweit lassen sich aus diesen Erkenntnissen Theorien (weiter-)entwickeln?

Die Re-Framing-Phase kann den Abschluss eines Forschungsprojektes markieren, aber auch den Ausgangspunkt für neue Forschung darstellen oder zusätzliche Fragen aufwerfen (Rohrbach-Lochner, 2019; L. Rott, 2018).

4.3 Herausforderungen und deren Begegnung

Datenerhebung DBR-Projekte finden in realen Bildungskontexten statt. Dabei treten viele Variablen auf, die den Erfolg der Intervention beeinflussen und nur schwer kontrolliert werden können. Folglich lassen sich kaum Kausalzusammenhänge zwischen Variablen ableiten. Dies ist aber auch nicht Ziel des DBR-Ansatzes. Vielmehr sollen durch sorgfältige Beobachtungen und Analysen die Intervention optimiert und die Funktionsweise verschiedener Designelemente untersucht werden. Dies setzt die Erhebung möglichst vieler Einflussvariablen voraus, die wiederum in einer erheblichen Datenmenge mündet, mit denen Forschende konfrontiert werden (Collins et al., 2004). Dieser Herausforderung kann durch eine sorgfältige Selektion der Daten begegnet werden.

Datenselektion Die Selektion der Daten stellt jedoch gleichzeitig eine weitere Herausforderung dar. Dabei können Forschende dazu neigen, bevorzugt die Daten auszuwählen, welche die eigenen Thesen stützen. Um dieser Problematik entgegenzuwirken, gibt es verschiedene Lösungsvorschläge. Zum einen sollten die Datenauswahl und die Bewertungskriterien ausführlich begründet und – wenn möglich – der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt werden, sodass sie von dieser überprüft werden können. Ebenso kann eine „selection before selection“ (Brown, 1992, S. 163) sinnvoll sein, indem beispielsweise Beobachtende oder Lehrkräfte interessante Interaktionen markieren, auf welche sich die anschließende Auswertung beschränkt (Brown, 1992).

Datenauswertung Doch nicht nur die Auswahl, sondern auch die Auswertung und Reflexion der Daten, werden in der Literatur kritisiert. Es wird die *Objektivität* in Frage gestellt, da Forschende im DBR-Ansatz zu stark in das Projekt selbst involviert seien und somit die Schlussfolgerungen verzerrt werden könnten – eine Problematik, mit der viele qualitative Forschungsmethoden konfrontiert sind.

Gleichzeitig wird argumentiert, dass die starke Einsicht der Forschenden in das Projekt die Aussagekraft der Schlussfolgerungen erhöhen und die Weiterentwicklung der Intervention unterstützen kann (T. Anderson & Shattuck, 2012). Onwuegbuzie und Leech (2007) geben einige Möglichkeiten an, um Verzerrungen in der Datenauswertung entgegenzuwirken, wie beispielsweise die Triangulation, der Austausch mit anderen Forschenden oder das Anführen mehrerer plausibler Erklärungen.

Wissenschaftlichkeit Neben der Objektivität wird nach Reinmann (2005) häufig die Wissenschaftlichkeit des DBR-Ansatzes generell in Frage gestellt. Beispielsweise kritisieren Shavelson et al. (2003), dass DBR-Projekte zu narrativen Erzählungen neigen, die keine Wahrhaftigkeit ihrer Erkenntnisse garantieren können. Die Autoren schlagen daher unter anderem vor, Methoden und Prinzipien von Experimentalstudien (z. B. Randomisierung) zu integrieren, um die wissenschaftliche Rigorosität design-basierter Ansätze zu gewährleisten und konkurrierende Hypothesen durch geeignete Tests auszuschließen.

Aus diesen Aussagen wird deutlich, dass die Autoren von einem Wissenschaftsverständnis geprägt sind, das den Schwerpunkt auf *quantitative* Forschung legt. Dieses setzt Wissenschaftlichkeit oder wissenschaftliche Härte im allgemeinen mit dem Erfüllen der drei klassischen Gütekriterien *empirischer* Forschung – *Objektivität*, *Reliabilität* und *Validität* – gleich. Der DBR-Ansatz beschränkt sich allerdings nicht nur auf quantitative Methoden, sondern schließt ebenso *qualitative* Methoden mit ein. Jedoch sind die „Gütekriterien quantitativer Forschung ... nicht eins zu eins auf die qualitative Forschung übertragbar“ (Kuckartz & Rädiker, 2022, S. 32).

Auch Reinmann (2022b) erachtet diese Kriterien als zu eng gefasst für den DBR-Ansatz, da dieser neben dem empirischen auch einen *designbasierten* Anteil besitzt. Sie schlägt daher alternative Kriterien vor, die sowohl die Wissenschaftlichkeit als auch die Designangemessenheit von DBR-Projekten berücksichtigen. Nach wiederholter Kritik dieser Zweiteilung durch andere Forschende rückt Reinmann (2022a) schließlich davon ab und räumt ein: „Mit dieser Strategie pendelt man, so meine Folgerung, ohne eigenen Navigator hin und her zwischen dem Bemühen, einen Platz im etablierten Wissenschaftsfeld zu finden, und dem Bestreben, dem Eigensinn

von DBR gerecht zu werden, und letztlich kommt man nirgendwo an“ (Reinmann, 2022a, S. 4).

Im Hinblick darauf vertritt Euler (2022) die Position, dass sich Gütekriterien stärker an den Kernmerkmalen des DBR orientieren sollten. Er formuliert daher ausgehend von einem DBR-Prozessmodell verschiedene Kriterien zur Durchführung von DBR-Projekten (Euler & Sloane, 2014b), die „unmittelbar an die Kernmerkmale und Handlungsfelder des DBR angebunden“ sind (Euler, 2022, S. 6). Die Kriterien sind weniger „als ein Normenkorsett mit einem rigiden Bindungsanspruch“ (Euler, 2022, S. 7) zu betrachten, sondern vielmehr als „orientierende, unabgeschlossene Leitlinien ..., die problembezogen modifiziert, erweitert und verworfen werden können“ (Euler, 2022, S. 7).

Im Einklang damit wurden im Arbeitskreis unter der Leitung von Prof. Dr. Annette Marohn Gütekriterien in einem internen Arbeitspapier entwickelt, die sich ebenfalls an den Merkmalen des DBR orientieren. Diese bieten eine Leitlinie für DBR-Projekte und lassen zugleich Raum für flexible Anpassungen an das jeweilige Forschungsprojekt.

Die in Abschnitt 4.1 dargestellte, eigene Zusammenstellung der Gütekriterien nach dem internen Arbeitspapier dient auch in der vorliegenden Arbeit als Leitlinie für den Projektverlauf und die Reflexion der Güte des Projekts (siehe Abschnitt 14.1).

5 Methodische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die theoretischen Grundlagen zum methodischen Vorgehen der vorliegenden Arbeit erläutert. Dazu wird zunächst der Verfahrensrahmen nach Salle und Clüver (2021) vorgestellt (siehe Abschnitt 5.1), der als Orientierung für die Herleitung der Grundvorstellungen in Kapitel 8 diene. Anschließend erfolgt ein Überblick über die verwendeten Methoden zur Datenerhebung (siehe Abschnitt 5.2) und Datenauswertung (siehe Abschnitt 5.3). Die entsprechende Ausgestaltung und Übertragung der Methoden auf das vorliegende Projekt erfolgt in den jeweiligen Kapiteln des Design-Experiments (siehe Teil V).

5.1 Verfahrensrahmen zur Herleitung von Grundvorstellungen

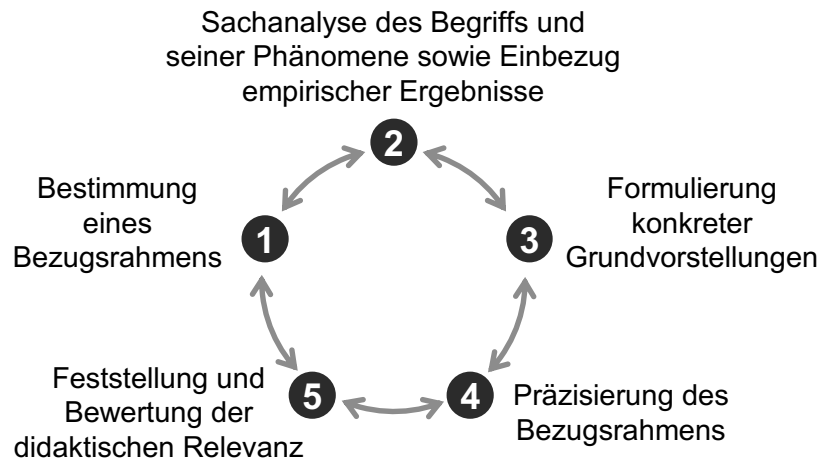
Aufgrund des Mangels an Leitlinien und Transparenz in Bezug auf die Herleitung von Grundvorstellungen entwickelten Salle und Clüver (2021) einen Verfahrensrahmen, der eine systematische Herangehensweise an den Herleitungsprozess ermöglicht. Eine Übersicht über die einzelnen Schritte des Verfahrens ist in Abbildung 5.1 dargestellt.

Die zyklische Darstellung wurde gewählt, da nach den Autoren die Schritte „als flexibel zu durchlaufender Kreislauf zu verstehen“ (Salle & Clüver, 2021, S. 564) sind.

In Schritt 1 des Verfahrens wird ein erster Bezugsrahmen für den Herleitungsprozess bestimmt. Dabei wird festgelegt, zu welchem Begriff die Grundvorstellungen formuliert und welche Gültigkeitsbereiche (z. B. Bereich der natürlichen Zahlen) betrachtet werden sollen. Zudem gilt es Kenntnisse und Kompetenzen sowie Grundvorstellungen zu anderen Begriffen zusammenzufassen, die für den Aufbau der

Abbildung 5.1

Die fünf Schritte zur Herleitung von Grundvorstellungen (Salle & Clüver, 2021) in einer zyklischen Darstellung



Anmerkung. Eigene Darstellung, bereits veröffentlicht in Meyer und Marohn (2024, S. 4906).

Grundvorstellungen des Begriffs notwendig sind. Mögliche Anhaltspunkte dafür sind curriculare Vorgaben, empirische Studien oder die Begriffsgeschichte.

In Schritt 2 werden die mathematischen Grundlagen des Begriffs, dazugehörige Phänomene sowie empirische Ergebnisse analysiert und zu Klassen zusammengefasst, auf deren Basis im nächsten Schritt die Grundvorstellungen formuliert werden.

Dazu werden zunächst mathematische Definitionen des Begriffs zusammengetragen und auf Gemeinsamkeiten und Unterschiede untersucht. Weiterhin werden die zentralen Bestandteile der Definitionen wie Objekte und Operationen herausgestellt, die dann durch „Einbettung in die Phänomene als Kernelemente charakterisiert werden“ (Salle & Clüver, 2021, S. 566). Salle und Clüver (2021) verdeutlichen dies am Sinusbegriff, den sie unter anderem als Seitenverhältnis in einem rechtwinkligen Dreieck definieren. Die zentralen Bestandteile der Definition, wie „rechtwinkliges Dreieck“, „Hypotenuse“, „Gegenkathete“ und „ $\sin(\alpha)$ “, werden dann durch Einbettung in Phänomene mit orthogonalen Projektionen (z. B. Schattenwurf) zu den Kernelementen „Projektionsfigur“, „projizierende Seite“, „projizierte Seite“ sowie „Faktor“, um welchen sich die zu projizierende Seite verkürzt.

Zur Sammlung und Analyse relevanter Phänomene geben die Autoren drei Bereiche an, die zu berücksichtigen sind. Der erste Bereich zielt auf die Anwendung des Begriffs in inner- und außermathematischen Kontexten sowie in verwandten Disziplinen ab. Dazu werden Aufgaben und Lösungen aus Schulbüchern herangezogen. Anschließend wird analysiert, wie genau der Begriff in den identifizierten Phänomenen verwendet wird.

Im zweiten Bereich geht es um die historische Entwicklung des Begriffs. Anwendungsfelder, die zur Entwicklung des Begriffs geführt haben, Vorläuferbegriffe sowie Etappen der Begriffsentwicklung können wertvolle Hinweise für die Herleitung der Grundvorstellungen liefern.

Da Darstellungen sowie die Übersetzung zwischen Darstellungen für die Ausbildung von Grundvorstellungen zentral sind (siehe Abschnitt 3.3.3), zielt der dritte Bereich auf die Analyse typischer Darstellungen ab, die im Umgang mit dem Begriff auftreten. Gleichzeitig wird analysiert, welche Übersetzungsprozesse zwischen den Darstellungen notwendig sind.

Ein weiterer wichtiger Aspekt bei der Herleitung von Grundvorstellungen ist die Berücksichtigung der Perspektive der Lernenden. Dazu werden empirische Befunde zu individuellen Vorstellungen des jeweiligen Begriffs analysiert.

Abschließend werden in Schritt 2 die Bestandteile der mathematischen Definitionen mit den identifizierten Phänomenen in Beziehung gesetzt und so Kernelemente herausgearbeitet. Diese werden gruppiert und zu Klassen zusammengefasst.

In Schritt 3 werden dann auf Basis der zuvor gebildeten Klassen die Grundvorstellungen formuliert, indem jeweils die „Klasse als Gesamtes betrachtet und die dahinterliegende idealtypische Repräsentation des betrachteten Begriffs festgehalten“ (Salle & Clüver, 2021, S. 568) wird.

Anschließend wird das auszubildende Grundverständnis analysiert, indem Beziehungen zwischen den Grundvorstellungen betrachtet werden. So können die formulierten Grundvorstellungen untereinander aufbauend sein und somit eine Reihenfolge zur Vermittlung der Grundvorstellungen festlegen.

In Schritt 4 kann der zu Beginn festgelegte Bezugsrahmen präzisiert werden. Beispielsweise können sich durch die hergeleiteten Grundvorstellungen zusätzliche

Kenntnisse oder Beziehungen zu anderen Grundvorstellungen und Begriffen ergeben, die für die Tragfähigkeit und Anwendung der Grundvorstellungen von Bedeutung sind.

In Schritt 5 erfolgt die Feststellung und Bewertung der didaktischen Relevanz. Diese ist nach Salle und Clüver (2021) auf zwei Ebenen zu beurteilen. Zum einen sind die individuellen Vorstellungen der Lernenden zu erheben und es ist zu analysieren, inwieweit die normativ formulierten Grundvorstellungen mit diesen Vorstellungen übereinstimmen und Erklärungsmuster für das Handeln der Lernenden darstellen. Zum anderen gilt es den Nutzen der Grundvorstellungen in Lehr-Lern-Situationen zu evaluieren.

Abschließend ist anzumerken, dass der Verfahrensrahmen zwar dazu beiträgt, die Herleitung von Grundvorstellungen zu systematisieren, die Herleitung selbst jedoch ein konstruktiver Prozess ist, „bei dem die resultierenden Grundvorstellungen durch Entscheidungen der Forschenden geprägt sind“ (Salle & Clüver, 2021, S. 562). Für eine bessere Nachvollziehbarkeit und mögliche Diskussion über die formulierten Grundvorstellungen, sollten demnach die getroffenen Entscheidungen sowie das generelle Vorgehen expliziert werden (Salle & Clüver, 2021).

5.2 Datenerhebung

5.2.1 Artefakte

Im Rahmen dieser Arbeit dienen die Artefakte als Datengrundlage für die Optimierung der Lernmaterialien (siehe Abschnitt 9.3) sowie die Analyse der intendierten Bearbeitung der Lernmaterialien (siehe Abschnitt 10.2).

Als Artefakte werden in Anlehnung an frühere DBR-Projekte (z. B. Egbers, 2017; Jürgensmeier, 2020; Kolbeck, 2019; L. Rott, 2018) die von Lernenden im Rahmen der Intervention bearbeiteten Lernmaterialien bezeichnet. In dieser Arbeit beziehen sich die Artefakte auf die entwickelten Lernmaterialien zum Thema Dichte (siehe Kapitel 9), die von den Lernenden während der Erprobungen bearbeitet werden. Die Materialien erfüllen somit eine doppelte Funktion: Sie fungieren sowohl als Da-

tengrundlage für die Forschung als auch als Lerngegenstand bei den Erprobungen (Banse, 2025; Jürgensmeier, 2020).

5.2.2 Interviews

Im Rahmen dieser Arbeit werden Interviews verwendet, um zu erheben, inwiefern sich die hergeleiteten Grundvorstellungen als individuelle Vorstellungen bei Lernenden identifizieren lassen (siehe Abschnitt 8.5).

Ein Interview bezeichnet „die zielgerichtete, systematische und regelgeleitete Generierung und Erfassung von verbalen Äußerungen einer Befragungsperson (Einzelbefragung) oder mehrerer Befragungspersonen (Paar-, Gruppenbefragung)“ (Döring & Bortz, 2016, S. 356).

Es existiert eine Vielzahl an verschiedenen Interviewarten, die sich unter anderem nach ihrem Grad an Strukturierung unterscheiden lassen. Für diese Arbeit sind insbesondere problemzentrierte Interviews von Interesse, die zu den halbstrukturierten Interviews zuzuordnen sind (Döring & Bortz, 2016) und insbesondere zur Erhebung individueller Vorstellungen zu naturwissenschaftlichen Phänomenen geeignet sind (Krüger et al., 2014).

Halbstrukturierte oder auch leitfadengestützte Interviews basieren stets auf einer Liste offener Fragen, dem sogenannten *Leitfaden*. Dieser dient als Grundgerüst für das Interview und bietet gleichzeitig genügend Flexibilität, um die Wortwahl, die Reihenfolge der Fragen oder Zusatzfragen entsprechend der Interviewsituation anzupassen (Döring & Bortz, 2016). Die Besonderheit bei problemzentrierten Interviews ist, dass diese sich auf ein bestimmtes (naturwissenschaftliches) Phänomen beziehen (Krüger et al., 2014), in diesem Fall auf die Dichte.

5.2.3 Videographien

Im Rahmen dieser Arbeit werden Videographien verwendet, um Schwierigkeiten (siehe Abschnitt 9.3) sowie Lernprozesse (siehe Abschnitt 10.2) im Umgang mit den entwickelten Lernmaterialien zu analysieren.

In Kapitel 4 wurde bereits darauf hingewiesen, dass die in DBR-Projekten entwickelten Interventionen in realen Bildungssituationen erprobt und evaluiert werden.

Im Rahmen dieser Arbeit handelt es sich dabei um konkrete Unterrichtssituationen mit Schulklassen.

Da Unterricht ein „komplexes Interaktionsgeschehen [ist], an dem Lehrer/innen und Schüler/innen mit je unterschiedlichen Vorerfahrungen, Interessen, Kenntnissen und Fähigkeiten beteiligt sind“ (Herrle et al., 2016, S. 9), bedarf es geeigneter Erhebungsinstrumente zur Dokumentation des komplexen Unterrichtsgeschehens. Als besonders vielversprechend gilt die Videographie, da diese im Vergleich zu alternativen Beobachtungsmethoden „eine Vielzahl von simultan wahrnehmbaren Phänomenen“ (Herrle et al., 2016, S. 9) dokumentieren können.

Diese Vielfalt an wahrnehmbaren Phänomenen kann jedoch nicht in ihrer Gänze erfasst und analysiert werden. Stattdessen „ist eine Selektion von als letztlich erkenntnisrelevant behandelten Daten aus dem im Video potenziell Wahrnehmbaren zwingend notwendig“ (Dinkelager, 2016, S. 50). Dazu werden die Videos wiederholt nach Ereignissen durchsucht, die potenziell für die Forschungsfrage von Relevanz sind. Diese Ereignisse werden anschließend transkribiert, um eine vertiefende Analyse zu ermöglichen (Dinkelager, 2016).

Bei der Durchführung von Videographien gilt es zu beachten, dass die Erlaubnis zur Erhebung und Nutzung von Videodaten von den beteiligten sowie institutionell verantwortlichen Personen eingeholt wird (Herrle & Breitenbach, 2016).

5.2.4 Tests und Fragebögen

Im Rahmen dieser Arbeit werden Tests eingesetzt, um die Entwicklung der Vorstellungen von Lernenden in Richtung der hergeleiteten Grundvorstellungen (siehe Abschnitt 10.4) zu analysieren. Zudem werden Fragebögen verwendet, um die persönliche Sichtweise der Lernenden zu bestimmten Aspekten der entwickelten Unterrichtskonzeption (siehe Abschnitt 10.3) zu erfassen.

Sowohl Tests als auch Fragebögen werden verwendet, um Informationen von Individuen zu sammeln. Der Hauptunterschied zwischen beiden Instrumenten liegt in der Art der Informationen, die erhoben werden (Krüger et al., 2014): Tests messen Wissen oder Fähigkeiten, während Fragebögen Informationen über Einstellungen, Verhaltensweisen oder Meinungen sammeln. Somit gibt es bei Fragebögen im Gegensatz zu Tests keine prinzipiell richtigen oder falschen Antworten (Krüger et al., 2014).

Tests und Fragebögen setzen sich aus mehreren Items in Form von beispielsweise Fragen, Aufgaben oder Aussagen zusammen, die sich im wesentlichen in offene und geschlossene Items unterteilen lassen (Krüger et al., 2014; Steiner & Benesch, 2021). Bei offenen Items können Personen ihre Antwort frei formulieren, während bei geschlossenen Items die Antwortmöglichkeiten vorgegeben sind. Es sind auch Mischformen denkbar (halboffene Items), wenn beispielsweise Antwortmöglichkeiten vorgegeben sind, aber zusätzlich ein Feld zur Verfügung steht, in das individuelle Antworten eingetragen werden können (Döring & Bortz, 2016; Porst, 2014).

Bei Tests setzen sich geschlossene Aufgaben häufig aus Multiple-Choice-Aufgaben zusammen (Krüger et al., 2014), während bei Fragebögen meist Ratingskalen verwendet werden (Steiner & Benesch, 2021). Letzteres bezieht sich auf ein Itemformat, bei dem die Befragten ihren Grad der Zustimmung oder Ablehnung zu einer bestimmten Aussage anhand vorgegebener Abstufungen angeben. Die Anzahl der Abstufungen und die Entscheidung, ob diese gerade oder ungerade sind, beeinflussen die Differenziertheit der Antworten sowie die Möglichkeit, eine neutrale Position einzunehmen. Eine Maximalanzahl von 5-7 Abstufungen wird als angemessen erachtet (Steiner & Benesch, 2021).

Inwiefern offene oder geschlossene Items besser für ein bestimmtes Forschungsinteresse geeignet sind, kann nicht eindeutig beantwortet werden, da beide Formate verschiedene Vorteile bieten (Krüger et al., 2014). So vermeiden offene Items beispielsweise das Raten bei Wissensabfragen und das Lenken von Befragten in eine bestimmte Richtung (Baur & Blasius, 2022). Geschlossene Items können hingegen besonders einfach und objektiv ausgewertet werden (Krüger et al., 2014).

Nach Döring und Bortz (2016) sollte bei der Konstruktion von Tests und Fragebögen auf etablierte Erhebungsinstrumente und Items zurückgegriffen werden, welche bei Bedarf angepasst werden können. Ist dies nicht möglich, müssen eigene Items entwickelt werden. In jedem Fall sollten die entwickelten Erhebungsinstrumente mithilfe von Pretests, wie etwa dem Einholen von Feedback von Fachkolleginnen und -kollegen, überprüft und optimiert werden, um deren Güte zu gewährleisten (Döring & Bortz, 2016; Krüger et al., 2014).

In Bezug auf DBR-Projekte ist allerdings anzumerken, dass:

- deren dynamischer Verlauf und die Anpassung der Forschungsausrichtung aufgrund neuer Erkenntnisse häufig eine kontinuierliche Anpassung der Erhebungsinstrumente erfordern (Hoadley, 2004). Daher sind umfangreiche Pretests, wie sie in anderen Forschungskontexten üblich sind, oft nicht praktikabel.
- Tests und Fragebögen bei Erprobungen im Feld auf „die absolut notwendigen Datenerhebungen zu beschränken [sind]. Nice to know Aspekte müssen hinter need to know-Fragen zurücktreten.“ (Wilhelm & Hopf, 2014, S. 37). Eine Erhöhung der Itemanzahl zugunsten der Reliabilität (Döring & Bortz, 2016) ist demnach nicht umsetzbar.
- neue und innovative Lösungen zu Problemen entwickelt werden, sodass passende und bereits etablierte Erhebungsinstrumente und Items häufig nicht verfügbar sind (McKenney & Reeves, 2012).

Dennoch ist es wichtig, auch in DBR-Projekten auf eine angemessene, wenn auch pragmatische, Überprüfung der Erhebungsinstrumente zu achten, um eine hinreichende Güte sicherzustellen.

5.2.5 Expertinnen- und Expertenreview

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Expertinnen- und Expertenreview durchgeführt, um die erste Version der entwickelten Intervention zu evaluieren und darauf basierend zu optimieren (siehe Abschnitt 9.3).

Das Expertinnen- und Expertenreview ist eine geeignete Methode zur Evaluation der entwickelten Intervention im DBR-Ansatz (McKenney & Reeves, 2012; Vesper et al., 2011). Dazu werden zunächst geeignete Expertinnen- und Experten inner- oder außerhalb einer Organisation ggf. mithilfe von Umfragen rekrutiert (Rothwell et al., 2016). In Frage kommen dabei beispielsweise Lehrkräfte oder Fachdidaktikerinnen und Fachdidaktiker (Tessmer, 1994).

Anschließend werden die Teilnehmenden des Reviews in der Regel dazu aufgefordert, die Intervention oder relevante Teile dieser aus der Perspektive der Zielgruppe durchzugehen (*Walk-Through*) und dabei Feedback zu geben. Dieses kann bei-

spielsweise in Form mündlicher Rückmeldungen oder schriftlicher Anmerkungen am konkreten Material erfolgen (McKenney & Reeves, 2012).

Üblicherweise werden die Reviews nicht in Gruppen durchgeführt, sodass jede Person individuell Feedback gibt (Rothwell et al., 2016). Als Alternative schlägt Tessmer (1994) die Gremiumbegutachtung (*panel review*) vor, in der die Expertinnen- und Experten gemeinsam in Kleingruppen und ggf. mit der forschenden Person über die Materialien diskutieren.

Einen Vorteil dieser Methode sieht Tessmer (1994) darin, dass sich die Teilnehmenden austauschen und so Konsens oder Uneinigkeit über Schwierigkeiten und Verbesserungen sichtbar werden. Nachteilig ist, dass die Diskussion vom Thema abweichen oder zu viel Zeit in Anspruch nehmen kann. Deshalb sollte die forschende Person klare Aufgaben stellen und den Reviewprozess moderieren (Tessmer, 1994).

5.3 Datenauswertung

5.3.1 Qualitative Inhaltsanalyse

Die Qualitative Inhaltsanalyse (QIA) wird in der vorliegenden Arbeit im Rahmen der Herleitung der Grundvorstellungen (siehe Kapitel 8), der Artefaktanalyse (siehe Abschnitt 10.2) sowie der Auswertung der Prä-Post-Tests (siehe Abschnitt 10.4) angewendet. Dabei wurde die dafür geeignete Software MAXQDA verwendet.

Unter der QIA ist eine wissenschaftliche Methode zur Auswertung und Analyse qualitativer Daten zu verstehen. Sie „zielt darauf ab, aus qualitativem Text- oder Bildmaterial systematisch v. a. die manifesten Inhalte durch Kategorienbildung herauszuarbeiten und diese bei Bedarf auch zu quantifizieren“ (Döring & Bortz, 2016, S. 602).

In der Literatur lassen sich verschiedene Arten der QIA finden, allerdings „besteht Einigkeit darüber, dass die strukturierende Inhaltsanalyse *das* [Hervorhebung im Original] inhaltsanalytische Kernverfahren ist“ (Kuckartz & Rädiker, 2022, S. 111). Auch in dieser Arbeit wird die inhaltlich-strukturierende QIA zur Datenauswertung verwendet, die im Folgenden nach Kuckartz und Rädiker (2022) dargestellt wird und sich in sieben Phasen gliedert:

Phase 1: Initiierende Textarbeit

In dieser Phase wird möglichst viel Datenmaterial explorativ gesichtet. Dabei werden unter anderem wichtige Stellen markiert, kommentiert und zusammengefasst. Ziel ist es, ein Gesamtverständnis der Daten unter Berücksichtigung der Forschungsfrage(n) zu erlangen und so die weitere Analyse vorzubereiten.

Phase 2: Hauptkategorien entwickeln

In dieser Phase beginnt der Kern der QIA: die Einteilung der Daten in verschiedene Kategorien. Die Kategorienbildung kann deduktiv erfolgen, indem beispielsweise bereits aus der Theorie abgeleitete Kategorien genutzt werden, oder induktiv, indem die Kategorien anhand der vorliegenden Daten entwickelt werden. Häufig wird ein deduktiv-induktives Verfahren gewählt: Zunächst werden grobe Kategorien deduktiv vorgegeben, die im weiteren Verlauf induktiv anhand des Datenmaterials weiter ausdifferenziert werden.

Die in dieser Phase zu entwickelnden Hauptkategorien werden meist deduktiv aus den Forschungsfragen abgeleitet, können sich jedoch vereinzelt auch induktiv aus der initiierenden Textarbeit ergeben. Bei den Hauptkategorien handelt es sich überwiegend um thematische Kategorien, die zur inhaltlichen Strukturierung der Daten dienen.

Phase 3: Daten mit Hauptkategorien codieren (1. Codierprozess)

In dieser Phase werden die Daten anhand der entwickelten Hauptkategorien codiert. Segmente, die für die Forschungsfragen nicht von Relevanz sind, bleiben dabei uncodiert.

Phase 4: Induktiv Subkategorien bilden

Die mit den Hauptkategorien codierten Segmente werden in dieser Phase gesichtet und auf Basis dieser induktiv Subkategorien gebildet, sodass die Hauptkategorien weiter ausdifferenziert werden.

Phase 5: Daten mit Subkategorien codieren (2. Codierprozess)

In einem weiteren Codierprozess werden die mit den Hauptkategorien codierten Segmente mit den Subkategorien codiert. Es kann dabei vorkommen, dass das zu-

vor entwickelte Subkategoriensystem angepasst oder erweitert werden muss. Die Phasen 4 und 5 werden dabei zyklisch durchlaufen.

Phasen 6 und 7: Analysen und Ergebnisdarstellung

In diesen beiden Phasen werden die codierten Daten analysiert und die entsprechenden Ergebnisse präsentiert. Häufig beginnt die Analyse entlang der Hauptkategorien. Die Häufigkeiten der verschiedenen Subkategorien innerhalb einer Hauptkategorie werden dabei dargestellt und qualitativ durch Zitate bzw. Beispiele aus dem Datenmaterial untermauert. Daran können sich Analysen von Zusammenhängen zwischen Kategorien, Fall- oder Gruppenvergleiche anschließen.

Um die Qualität des im Rahmen der QIA entwickelten Kategoriensystems sicherzustellen, sollten die Daten mindestens von einer weiteren Person anhand des Kategoriensystems codiert werden. Das Maß der Übereinstimmung der Codierungen beider Personen wird als *Intercoder-Reliabilität* bezeichnet und stellt ein wichtiges Gütekriterium für die Analyse dar. Die Intercoder-Reliabilität wird häufig mit dem Kappa-Koeffizienten (z. B. nach Cohen) ausgedrückt, der sich aus der prozentualen Übereinstimmung und der geschätzten zufälligen Übereinstimmung berechnet. Nach der häufig zitierten Einteilung von Landis und Koch (1977) können Kappa-Werte zwischen .41 und .60 als moderate, zwischen .61 und .80 als substantielle und über .80 als nahezu perfekte Übereinstimmung interpretiert werden.

Als geeignete Alternative oder Ergänzung zur Berechnung der Intercoder-Reliabilität sehen Kuckartz und Rädiker (2022) das sogenannte *konsensuelle Codieren*. Dabei diskutieren die beiden Codierenden über Nicht-Übereinstimmungen, einigen sich unter Berücksichtigung der Kategoriendefinitionen auf eine gemeinsame Codierung und passen, falls nötig, das Kategoriensystem entsprechend an.

5.3.2 Statistische Tests

In diesem Unterabschnitt werden die beiden statistischen Tests beschrieben, die im Rahmen der Prä-Post-(Follow-up)-Testung zur Überprüfung signifikanter Veränderungen verwendet werden (siehe Abschnitt 10.4). Dies ist primär als ein Überblick zu verstehen, der als Entscheidungsgrundlage für die Anwendung der Tests dienen soll. Ausführliche Darstellungen der mathematischen Herleitung und Berechnung

der Tests finden sich beispielsweise in Bortz et al. (2008). Die Berechnungen wurden mithilfe von SPSS und dem *Real Statistics Resource Pack* für Excel durchgeführt.

Wilcoxon-Test Der Wilcoxon-Test, auch Vorzeichenrangtest genannt, ist ein nicht-parametrisches bzw. verteilungsfreies Verfahren zum Vergleich zweier abhängiger Stichproben. Er stellt somit eine Alternative zum *t*-Test dar, wenn die Voraussetzungen dafür, wie etwa eine Normalverteilung und metrische Skalierung der abhängigen Variable, insbesondere bei kleinen Stichproben ($N < 30$), nicht erfüllt sind (Bortz et al., 2008; Bortz & Schuster, 2010).

Mit dem Test kann überprüft werden, ob sich die zentralen Tendenzen der beiden verbundenen Messungen signifikant unterscheiden. Dazu werden zunächst die Differenzen der gepaarten Messpunkte berechnet, deren Beträge aufsteigend sortiert und anschließend mit Rangplätzen sowie dem Vorzeichen der ursprünglichen Differenz versehen. Das Minimum der jeweiligen Rangsummen der positiven und negativen Differenzen entspricht dem Prüfwert des Tests (Bortz et al., 2008).

Der Vorzeichenrangtest setzt voraus, dass die Daten mindestens ordinalskaliert vorliegen und die Differenzen zwischen den gepaarten Messwerten in etwa symmetrisch verteilt sind (Bortz et al., 2008).

Friedman-Test Der Friedman-Test stellt eine nichtparametrische Alternative zur Varianzanalyse mit Messwiederholung dar und wird eingesetzt, wenn mehr als zwei verbundene Stichproben beziehungsweise Messzeitpunkte (z. B. in Prä-Post-Follow-up-Designs) miteinander verglichen werden sollen (Eid et al., 2011).

Analog zum Wilcoxon-Vorzeichenrangtest setzt auch der Friedman-Test mindestens ordinalskalierte Daten voraus und basiert auf einer Rangtransformation der Daten. Die Rangvergabe erfolgt beim Friedman-Test innerhalb jeder Versuchsperson über alle Messzeitpunkte hinweg. Die so ermittelten Ränge werden für jeden Messzeitpunkt aufsummiert, und die Teststatistik ergibt sich aus der Verteilung dieser Rangsummen (Bortz et al., 2008; Pereira et al., 2015).

Zeigt der Friedman-Test einen signifikanten Unterschied zwischen den Messzeitpunkten, können verschiedene Post-hoc-Tests zum paarweisen Vergleich eingesetzt werden, um herauszufinden, zwischen welchen Messzeitpunkten Signifikanzen vorliegen (Pereira et al., 2015). Beispiele für Post-hoc-Tests in abnehmender

Konservativität sind der Vorzeichentest, der Wilcoxon-Vorzeichenrangtest und der Conover-Test⁹.

Da bei mehrfachen Paarvergleichen das Risiko für einen Fehler erster Art (fälschliches Verwerfen der Nullhypothese) zunimmt, sollte entsprechend eine Fehlerkorrektur durch Anpassung des Signifikanzniveaus vorgenommen werden (Bortz & Schuster, 2010). Eine sehr einfache, aber auch sehr konservative Korrektur ist die Bonferroni-Korrektur, bei der das festgelegte Signifikanzniveau durch die Anzahl der durchgeführten Paarvergleiche dividiert bzw. die berechneten p-Werte mit der entsprechenden Anzahl multipliziert werden (Bortz & Schuster, 2010; Pereira et al., 2015).

⁹Dieser Test wird von Conover als „the usual parametric procedure, called Fisher’s least significant difference, computed on the ranks rather than the data“ beschrieben (W. J. Conover & Conover, 1999, S. 296) und wurde von W. Conover und Iman (1979) entwickelt. Pereira et al. (2015) verwenden jedoch stattdessen die Bezeichnung Fisher’s LSD Test.

Teil IV

Framing

6 Ausgangslage und Zielsetzung

In diesem Kapitel wird unter Rückbezug zum theoretischen Hintergrund die Ausgangslage und Zielsetzung der vorliegenden Arbeit dargelegt. Dazu werden die wichtigsten Erkenntnisse des theoretischen Hintergrunds mit entsprechendem Verweis zu den Kapiteln und Abschnitten zusammengefasst.

Den Ausgangspunkt der vorliegenden Arbeit bilden mathematische Begriffe im Chemieunterricht. Darunter werden Begriffe wie etwa die Dichte oder die Stoffmenge verstanden, die eine Quantifizierung chemischer Zusammenhänge ermöglichen und mithilfe von Berechnungen und Gleichungen beschrieben werden können (siehe Abschnitt 1.1).

In Abschnitt 1.2 wurde die Relevanz mathematischer Begriffe für den Chemieunterricht aus curricularer, fachdidaktischer und empirischer Sicht dargelegt. So sind mathematische Begriffe bereits für die Sekundarstufe I fest in den aktuellen Bildungsstandards verankert und bieten aus fachdidaktischer Sicht unter anderem die Möglichkeit, ein vertieftes Verständnis chemischer Zusammenhänge zu fördern. Positive Einflüsse auf die Chemie- und Mathematikkenntnisse von Lernenden durch die Integration mathematischer Betrachtungen im Chemieunterricht deuteten sich auch in empirischen Untersuchungen an.

Gleichzeitig wurde in Abschnitt 1.4 deutlich, dass der Umgang mit mathematischen Begriffen im Chemieunterricht mit einigen Herausforderungen verbunden ist. Häufige Schwierigkeiten von Lernenden umfassen (a) den Umgang mit Darstellungsmitteln auf der Symbolebene, (b) ein mangelndes konzeptuelles Verständnis mathematisch-chemischer Begriffe, (c) alternative Vorstellungen zu diesen Begriffen, (d) eine Tendenz zum algorithmischen Problemlösen und (e) vereinzelt Schwierigkeiten im Umgang mit mathematischen Inhalten wie dem Logarithmus, Zehnerpotenzen oder Graphen.

Daraus ergibt sich folgendes Problem für die Bildungspraxis:

Mathematische Begriffe sind für den Chemieunterricht von zentraler Relevanz, verursachen jedoch bei den Lernenden häufig Verständnisschwierigkeiten.

Diesem Problem nähert sich die vorliegende Arbeit unter der folgenden Fragestellung an:

In welcher Weise lässt sich das Verstehen mathematischer Begriffe im Chemieunterricht fördern?

Ein geeigneter Forschungsrahmen zur Beantwortung der Forschungsfrage und gleichzeitiger Begegnung des Problems ist der DBR-Ansatz (siehe Kapitel 4). Dieser zielt neben der Entwicklung einer praxistauglichen Intervention (praktischer Output), ebenfalls auf die Generierung theoretischer Erkenntnisse beispielsweise zur Funktionsweise der Intervention ab (theoretischer Output).

In Abschnitt 1.5 wurde zunächst ein Überblick über bereits bestehende Ansätze zur Begegnung von Schwierigkeiten im Umgang mit mathematischen Begriffen im Chemieunterricht gegeben. Der Großteil dieser Ansätze fokussiert sich dabei eher auf gezielte Maßnahmen zur Verständnisförderung, wie die Verwendung von Veranschaulichungen, die Optimierung von Aufgabenstellungen durch kontextuelle Einbettung oder die Entwicklung spezifischer Unterstützungsmaßnahmen zur Bearbeitung dieser Aufgaben.

Es mangelt jedoch an geeigneten Unterrichtskonzepten zur Vermittlung mathematischer Begriffe im Chemieunterricht, wie auch von Lehrkräften beklagt wird. Die beiden präsentierten Unterrichtskonzepte basieren auf chemiedidaktischen Ansätzen. Eine Berücksichtigung mathematikdidaktischer Perspektiven ist in beiden Konzepten nicht erkennbar.

Darauf aufbauend lassen sich für die vorliegende Arbeit ein praxisorientiertes und ein theorieorientiertes Ziel formulieren:

- *Praxisorientiertes Ziel:* Entwicklung, Erprobung und Evaluation einer Unterrichtskonzeption mit begleitenden Lernmaterialien zur Förderung des Verständnisses mathematischer Begriffe im Chemieunterricht unter Berücksichtigung von sowohl chemie- als auch mathematikdidaktischen Ansätzen.
- *Theorieorientiertes Ziel:* Gewinnung theoriegenerierender Erkenntnisse über das Verstehen mathematischer Begriffe im Chemieunterricht sowie die Funktionsweisen und Wirksamkeit der Konzeption.

In Abschnitt 1.3 wurde das für den Chemieunterricht zentrale Johnstone-Dreieck präsentiert und als ein Bindeglied zwischen der Mathematik und der Chemie herausgearbeitet. So kann die Mathematik innerhalb des Johnstone-Dreiecks verortet oder das Johnstone-Dreieck auf mathematische Inhalte übertragen werden. Zudem wurde dargelegt, dass die Ebenen im Unterricht zwar klar voneinander getrennt, für ein vertieftes Verständnis jedoch miteinander verknüpft werden müssen. In Abschnitt 1.5 wurden darüber hinaus einige Ansätze präsentiert, in denen mathematisch-chemische Begriffe auf den drei Johnstone-Ebenen erarbeitet werden, um so das konzeptuelle Verständnis dieser Begriffe zu fördern.

In Kapitel 2 wurde das in der deutschsprachigen Mathematikdidaktik weit verbreitete Grundvorstellungskonzept vorgestellt. Nach diesem existieren zu einem Begriff mehrere idealtypische Repräsentationen (Grundvorstellungen), die im Gesamten ein Verständnis dieses Begriffs konstituieren, indem sie diesem Sinn geben, beim Anwenden unterstützen und mentales Operieren ermöglichen. Grundvorstellungen stellen demnach eine unverzichtbare Basis für eine verständnisorientierte Vermittlung mathematischer Inhalte dar.

Auf mathematisch-chemische Begriffe wurden Grundvorstellungen bislang zwar noch nicht übertragen, allerdings lassen sich vereinzelt Ansätze finden, die eine gewisse Parallelität zum Grundvorstellungskonzept aufweisen und daher einer Übertragung nahelegen (siehe Abschnitt 2.3).

Insgesamt wurden mit dem Johnstone-Dreieck und dem Grundvorstellungskonzept zwei Ansätze aufgegriffen, die in ihren jeweiligen Fachdidaktiken als zentral für die verständnisorientierte Vermittlung von Fachinhalten angesehen werden und zugleich einen starken Bezug zu mathematisch-chemischen Begriffen aufweisen.

Somit werden die folgenden zwei Ansätze zur Erreichung der zuvor formulierten Ziele verfolgt:

1. *Mathematikdidaktischer Ansatz:* Die Entwicklung von Grundvorstellungen bei den Lernenden.
2. *Chemiedidaktischer Ansatz:* Die Darstellung der mathematischen Begriffe auf den drei Johnstone-Ebenen.

Um den inhaltlichen Schwerpunkt der Förderung mathematischer Grundvorstellungen im Kontext des Chemieunterrichts zu verdeutlichen, trägt das im Rahmen

dieser Arbeit entwickelte Unterrichtskonzept den Namen *ma_Gic* – ein Akronym für *mathematische Grundvorstellungen im Chemieunterricht*.

Die Beantwortung der formulierten Forschungsfrage sowie das Erreichen der formulierten Ziele unter der Berücksichtigung der zwei zu verfolgenden Ansätze soll im Rahmen dieser Arbeit durch drei zentrale Schritte erfolgen:

1. Herleitung von Grundvorstellungen zu mathematisch-chemischen Begriffen unter Berücksichtigung der Johnstone-Ebenen (Kapitel 8).
2. Entwicklung einer Unterrichtskonzeption mit begleitenden Lernmaterialien zur Vermittlung der hergeleiteten Grundvorstellungen (Kapitel 9).
3. Evaluation der Wirksamkeit und Funktionalität der entwickelten Unterrichtskonzeption (Kapitel 10).

Die konkrete Umsetzung der Schritte und Ziele soll exemplarisch anhand des Dichtebegriffs erfolgen. Dieser eignet sich besonders gut, da er im Chemieunterricht als einer der ersten mathematischen Begriffe behandelt wird und zugleich stellvertretend für weitere intensive Größen wie die Stoffmengenkonzentration oder die molare Masse steht.

Im folgenden Kapitel werden die entsprechenden Forschungsfragen zu den jeweiligen Schritten formuliert.

7 Forschungsfragen

Im vorherigen Kapitel wurde die übergeordnete Forschungsfrage, die Zielsetzung dieser Arbeit sowie die entsprechenden Schritte zur Erreichung dieses Ziels formuliert. In diesem Kapitel wird ein Überblick über die jeweiligen Forschungsfragen gegeben, die jeden dieser Schritte weiter ausdifferenzieren und das Forschungsvorhaben der vorliegenden Arbeit strukturieren.

Die Herleitung von Grundvorstellungen am Beispiel des Dichtebegriffs (1. Schritt) wird durch die Forschungsfrage *F1* sowie die Subfragen *F1.1* bis *F1.10* adressiert. Die Subfragen orientieren sich dabei an den fünf Schritten zur Herleitung von Grundvorstellungen nach Salle und Clüver (2021), die in Abschnitt 5.1 präsentiert wurden.

Die Entwicklung der Unterrichtskonzeption mit begleitenden Lernmaterialien (Schritt 2) ist Gegenstand der Forschungsfrage *F2* sowie der zugehörigen Subfragen *F2.1* bis *F2.4*.

Die Evaluation der Wirksamkeit und Funktionalität der entwickelten Unterrichtskonzeption mit begleitenden Lernmaterialien (Schritt 3) wird durch die Forschungsfrage *F3* sowie die zugehörigen Subfragen aufgegriffen. Diese gliedern sich in drei Bereiche:

- Überprüfung der intendierten Bearbeitung der Lernmaterialien (*F3.1*)
- Bewertung der Unterrichtskonzeption durch die Lernenden (*F3.2*)
- Erhebung von Vorstellungsentwicklungen (*F3.3*)

Jeder dieser Bereiche ist wiederum durch spezifische Subfragen weiter ausdifferenziert (*F3.1.1* bis *F3.1.6*, *F3.2.1* bis *F3.2.7* sowie *F3.3.1* bis *F3.3.9*).

Die konkreten Fragen und Subfragen lauten wie folgt:

F1 Welche Grundvorstellungen lassen sich zur Dichte identifizieren?

Schritt 1: Bestimmung eines Bezugsrahmens

F1.1 Welcher Bezugsrahmen wird der Identifikation zugrunde gelegt?

Schritt 2: Sachanalyse des Begriffs und seiner Phänomene sowie Einbezug empirischer Ergebnisse

F1.2 Wie ist die Dichte definiert und wie hat sich der Dichtebegriff historisch entwickelt?

F1.3 Welche empirischen Erkenntnisse zum Dichtebegriff insbesondere zu individuellen Vorstellungen von Lernenden existieren bereits in der Literatur?

F1.4 Wie und in welchen Kontexten wird der Dichtebegriff verwendet und welche Darstellungen begleiten diese Anwendungen?

F1.5 Zu welchen Klassen lassen sich die Erkenntnisse aus der Sachanalyse (F1.2 – F1.4) zusammenfassen?

Schritt 3: Formulierung konkreter Grundvorstellungen

F1.6 Welche Grundvorstellungen lassen sich auf Basis der Klassen formulieren und inwiefern lassen sich diese den Johnstone-Ebenen zuordnen?

F1.7 Welche Zusammenhänge existieren zwischen den einzelnen Grundvorstellungen und inwiefern lässt sich daraus eine mögliche Reihenfolge zur Vermittlung der Grundvorstellungen formulieren?

Schritt 4: Präzisierung des Bezugsrahmens

F1.8 Inwiefern lässt sich der zu Beginn formulierte Bezugsrahmen weiter präzisieren?

Schritt 5: Feststellung und Bewertung der didaktischen Relevanz

F1.9 Inwiefern lassen sich die formulierten Grundvorstellungen als individuelle Vorstellungen der Lernenden identifizieren?

F1.10 Inwieweit bewähren sich die Grundvorstellungen in der Unterrichtsgestaltung?

F2 In welcher Weise lässt sich eine Unterrichtskonzeption mit begleitenden Lernmaterialien zur Entwicklung der identifizierten Grundvorstellungen gestalten?

F2.1 Welche Designprinzipien sollen die Materialien erfüllen?

F2.2 Welche Strukturierung ermöglicht die Umsetzung der Designprinzipien?

F2.3 In welcher Weise lassen sich die Designprinzipien konkret umsetzen?

F2.4 Welche (Verständnis-)Schwierigkeiten lassen sich im Umgang mit den Lernmaterialien identifizieren und welche Optimierungen lassen sich daraus ableiten?

F3 Inwiefern sind Funktionalität und Wirksamkeit der Unterrichtskonzeption mit begleitenden Lernmaterialien gegeben?

F3.1 Inwiefern bearbeiten die Lernenden die Materialien wie intendiert?

F3.1.1 Inwiefern stimmen die von den Lernenden erstellten Lösungen mit der angestrebten Musterlösung überein und welche typischen Abweichungen von der intendierten Lösung sind erkennbar?

F3.1.2 Welche Fragen stellen Lernende zu den Situationen auf dem Jahrmarktbild und inwiefern werden diese im Plenum beantwortet?

F3.1.3 Welche unterschiedlichen Lösungsstrategien verwenden Lernende bei der Bestimmung des „schwereren“ Stoffes (Aufgabe 1b, Würfelvorstellung)?

F3.1.4 Welche Vermutungen stellen Lernende zum Auftriebsverhalten der Schokoriegeln auf (Aufgabe 1a und 1b, Auftriebsvorstellung) und wie begründen sie diese?

F3.1.5 Inwiefern werden die Reflexionsaufgaben zur Würfel- und Auftriebsvorstellung im Plenum beantwortet?

F3.1.6 Inwiefern überprüfen die Gruppen die Regeln zum Aufsteigen, Schweben und Sinken in gasförmigen Stoffen (Aufgabe 3c, Auftriebsvorstellung)?

F3.2 Wie bewerten Lernende die Unterrichtskonzeption mit begleitenden Lernmaterialien?

- F3.2.1 Wie bewerten die Lernenden die allgemeine Struktur und Verständlichkeit der Lernmaterialien?*
- F3.2.2 Wie bewerten die Lernenden den Schwierigkeitsgrad der Lernmaterialien?*
- F3.2.3 Wie bewerten Lernende den Spaßfaktor bei der Bearbeitung der Aufgaben, Simulationen und Experimente?*
- F3.2.4 Inwiefern bewerten die Lernenden die Strukturierungselemente als hilfreich?*
- F3.2.5 Wie bewerten die Lernenden die Funktionsweise ausgewählter Designelemente?*
- F3.2.6 Inwiefern bewerten die Lernenden die Würfel- und Auftriebsvorstellung als verständlich und nützlich?*
- F3.2.7 Welche Aspekte gefallen den Lernenden besonders und wo sehen sie das größte Verbesserungspotential?*
- F3.3 Inwiefern initiiert die Intervention (langfristige) Vorstellungsentwicklungen von individuellen Vorstellungen hin zu den normativ formulierten Grundvorstellungen?*
 - F3.3.1 Inwieweit lässt sich ein Lernzuwachs bei der Bearbeitung vorstellungsorientierter Aufgaben zur Dichte vor und nach der Intervention feststellen?*
 - F3.3.2 Inwiefern vermuten und begründen die Lernenden vor und nach der Intervention den Auftrieb von Stoffen und Objekten in flüssigen Stoffen korrekt?*
 - F3.3.3 Inwiefern begründen die Lernenden vor und nach der Intervention den Auftrieb von Stoffen und Objekten in gasförmigen Stoffen korrekt?*
 - F3.3.4 Inwiefern begründen die Lernenden vor und nach der Intervention den Auftrieb von Stoffen und Objekten in flüssigen und gasförmigen Stoffen identisch?*
 - F3.3.5 Inwiefern nennen die Lernenden vor und nach der Intervention Aspekte der Auftriebsvorstellung und um welche handelt es sich dabei?*

- F3.3.6 Inwiefern interpretieren die Lernenden vor und nach der Intervention eine Dichteangabe mithilfe der Auftriebsvorstellung?*
- F3.3.7 Inwiefern erkennen und begründen die Lernenden vor und nach der Intervention die Unabhängigkeit der Dichte von der Menge eines Stoffes?*
- F3.3.8 Inwiefern nennen die Lernenden vor und nach der Intervention Aspekte der Würfelvorstellung und um welche handelt es sich dabei?*
- F3.3.9 Inwiefern interpretieren die Lernenden vor und nach der Intervention eine Dichteangabe mithilfe der Würfelvorstellung?*

Teil V

Design-Experiment

8 Grundvorstellungen zum Dichtebegriff und Zuordnung zu den Johnstone-Ebenen

In diesem Kapitel werden Grundvorstellungen zum Dichtebegriff hergeleitet und den Johnstone-Ebenen zugeordnet, wodurch die folgende Forschungsfrage beantwortet wird:

F1 Welche Grundvorstellungen lassen sich zur Dichte identifizieren?

Die Struktur dieses Kapitels orientiert sich an den fünf Schritten zur Herleitung von Grundvorstellungen nach Salle und Clüver (2021) (siehe Abschnitt 5.1). In den nachfolgenden Abschnitten wird jeder der fünf Schritte behandelt und es werden die entsprechenden Subfragen zu jedem Schritt beantwortet.

Die folgende Herleitung basiert in Teilen auf dem bereits veröffentlichten Artikel von Meyer und Marohn (2024), wurde jedoch für die Zwecke dieser Arbeit ausführlicher dargestellt und ergänzt.

8.1 Schritt 1: Bestimmung eines Bezugsrahmens

F1.1 Welcher Bezugsrahmen wird der Identifikation zugrunde gelegt?

Bei der Bestimmung des Bezugsrahmens wird nach Salle und Clüver (2021) festgelegt, welche Gültigkeitsbereiche des betreffenden Begriffs betrachtet werden und welche Kenntnisse, Fertigkeiten und Grundvorstellungen zu anderen Begriffen begriffsrelevant sind.

Da Grundvorstellungen zur Dichte hergeleitet werden sollen und die Vermittlung dieser im schulischen Kontext im Vordergrund steht, wird der vorläufige Bezugsrahmen auf Basis der Bildungsstandards und deren Interpretation in Form von Kernlehrplänen exemplarisch für das Bundesland Nordrhein-Westfalen festgelegt.

Bildungsstandards Sowohl in den Bildungsstandards von 2004 als auch in den aktuellen Bildungsstandards von 2024¹⁰ ist die Dichte implizit über den Umgang mit Stoffeigenschaften verankert. So sollen Lernende beispielsweise „bedeutsame Stoffe mit ihren typischen Eigenschaften“ (KMK, 2004, S. 11) benennen und beschreiben, „ein geeignetes Modell zur Deutung von Stoffeigenschaften auf Teilchenebene“ (KMK, 2004, S. 11) nutzen sowie „den Zusammenhang von äußeren Bedingungen und Stoffeigenschaften“ (KMK, 2024, S. 11) beschreiben.

Kernlehrpläne Eine ähnliche Situation zeigt sich bei den Kernlehrplänen. Lediglich in den Kernlehrplänen für das Gymnasium und für die Gesamtschule wird die Dichte explizit erwähnt. So wird beispielsweise im auslaufenden Kernlehrplan für Gymnasien die Vernetzung mit dem Fach Mathematik bei der Behandlung der Dichte empfohlen (Ministerium für Schule und Bildung des Landes Nordrhein-Westfalen, 2008). In der Gesamtschule ist die Dichte zudem fest im Fach Naturwissenschaften verankert. Lernende sollen dort „die Größen Druck und Dichte an Beispielen erläutern und quantitativ beschreiben“ (Ministerium für Schule und Bildung des Landes Nordrhein-Westfalen, 2019, S. 53) und den „Auftrieb sowie Schwimmen, Schweben und Sinken mit Hilfe ... der Dichte qualitativ erklären“ (Ministerium für Schule und Bildung des Landes Nordrhein-Westfalen, 2019, S. 53).

Schulinterne Lehrpläne Ein exemplarischer Ablauf der Behandlung der Dichte im Chemieunterricht ist in den Beispielen für schulinterne Lehrpläne dargestellt. Nach dem schulinternen Lehrplan für Gymnasien (NRW, 2020) wird die Dichte im Inhaltsfeld 1 *Stoffe und Stoffeigenschaften* zu Beginn der Jahrgangsstufe 7 neben anderen Stoffeigenschaften mithilfe eines Lernzirkels eingeführt. Dabei erar-

¹⁰Die Herleitung der Grundvorstellungen erfolgte auf Grundlage der zum Untersuchungszeitpunkt gültigen Bildungsstandards von 2004 und den damals aktuellen Schulbüchern. Aktuelle Neuerungen aus den Standards von 2024 werden an dieser Stelle ergänzend mit aufgegriffen, um die Anschlussfähigkeit an die aktuellen Bildungsvorgaben zu gewährleisten. Eine erneute Analyse mit den aktuellen Schulbüchern in Schritt 2 (siehe Abschnitt 8.2) erfolgte allerdings nicht mehr.

beiten die Lernenden Stoffeigenschaften, bestimmen diese experimentell und identifizieren so unbekannte Stoffe. Zu Beginn der 10. Jahrgangsstufe wird die Dichte im Inhaltsfeld 8 *Molekülverbindungen* im Kontext *Wasser, mehr als ein Lösemittel* erneut aufgegriffen. Dort sollen die Lernenden unter anderem die Dichteanomalie des Wassers anhand des Aufbaus des Wassermoleküls erklären.

In den schulinternen Lehrplänen für die Gesamtschule und die Realschule hingegen wird die Dichte im ersten Inhaltsfeld nicht explizit erwähnt. Stattdessen wird die Dichte erst in der zweiten Hälfte der Jahrgangsstufe 8 im Inhaltsfeld *Luft und Wasser* thematisiert. Hier sollen die Lernenden unter anderem mithilfe der Dichteanomalie Besonderheiten des Wassers, wie das Schwimmen von Eis im Wasser, erklären.

Fazit Insgesamt konnten die folgenden inhaltlichen Bereiche zur Dichte anhand der Bildungsstandards und Kernlehrpläne identifiziert werden:

- Charakterisierung und Identifizierung von Stoffen mithilfe der Dichte
- Bestimmung der Dichte
- Erklärung der Dichteanomalie von Wasser
- Betrachtung der Dichte auf submikroskopischer Ebene
- qualitative Beschreibung des Aufsteigens, Schwebens und Sinkens mithilfe der Dichte
- quantitative Beschreibung der Dichte

Auf Basis dieser inhaltlichen Bereiche können zudem verschiedene Kenntnisse abgeleitet werden, die als Voraussetzung für den Aufbau von Grundvorstellungen zur Dichte angenommen werden.

So sollten die Lernenden (a) für submikroskopische Betrachtungen Kenntnisse über ein einfaches Teilchenmodell haben, (b) für die Charakterisierung und Identifizierung von Stoffen den Stoffbegriff kennen und (c) für die Bestimmung der Dichte Kenntnisse und Vorstellungen über Masse und Volumen haben. Für die quantitative Beschreibung der Dichte und die Erklärung der Dichteanomalie von Wasser auf der makroskopischen Ebene können auch proportionale und antiproportionale Zuordnungen von Bedeutung sein.

8.2 Schritt 2: Sachanalyse des Dichtebegriffs

F1.2 Wie ist die Dichte definiert und wie hat sich der Dichtebegriff historisch entwickelt?

Definition

Nach der DIN 1306 Norm (DIN, 1971) ist die Dichte ρ eines Stoffes definiert als der Quotient aus der Masse m und dem Volumen V ,

$$\rho = \frac{m}{V}.$$

Als Quotient aus zwei extensiven Größen ist die Dichte eine intensive Größe, d. h. sie ist unabhängig von der Menge eines Stoffes. Zudem ergibt sich daraus eine proportionale Zuordnung zwischen Dichte und Masse sowie eine antiproportionale Zuordnung zwischen Dichte und Volumen (Wink & Ryan, 2019).

Zur Unterscheidung anderer Dichten, wie beispielsweise der Ladungs- oder der Energiedichte, kann die Dichte auch als *Massendichte* bezeichnet werden. Abzugrenzen ist die Dichte von der *Roh-* und der *Schüttdichte*, die Zwischen- und Hohlräume bei porösen und körnigen Stoffen berücksichtigen (DIN, 1971). So sind die Massendichten von Kristall- und Kandiszucker identisch, während sich die Schüttdichten aufgrund der Zwischenräume unterscheiden (Grüß-Niehaus & Schanze, 2010). Da es sich chemisch betrachtet bei beiden Zuckerarten um den gleichen Stoff handelt und eine Identifizierung von Stoffen mithilfe der Dichte nach dem in Schritt 1 festgelegten Bezugsrahmens möglich sein soll, werden die Roh- und die Schüttdichte aus dem weiteren Herleitungsprozess ausgeschlossen.

Weiterhin bleibt anzumerken, dass die Dichte eine temperatur- und druckabhängige Größe ist, weshalb nach DIN (1971), wenn nötig, bei Dichteangaben auch der Zustand des Stoffes anzugeben ist.

Historische Entwicklung

Im Folgenden soll ein kurzer Überblick über die wichtigen Etappen der Begriffsentwicklung gegeben werden. Für eine ausführlichere historische Betrachtung sei auf Heller (1970) verwiesen.

Implizit wurde die Dichte bereits von Archimedes (287 v. Chr.) im Kontext der Flüssigkeitsverdrängung entdeckt und verwendet (Hashweh, 2016). Als Auslöser für diese Entdeckung gilt die Legende, dass Archimedes in der Badewanne auf die Idee kam, die Echtheit einer Goldkrone durch Wasserverdrängung zu überprüfen. Daraufhin rannte er nackt durch die Straßen von Syrakus und rief: „Heureka!“ (Spivak, 1915).

Archimedes formulierte drei Prinzipien, die heute unter dem *Archimedischen Prinzip* zusammengefasst sind (Assis, 2010). Eines dieser Prinzipien lautet: „Any solid lighter than a fluid will, if placed in the fluid, be so far immersed that the weight of the solid will be equal to the weight of the fluid displaced“ (Archimedes, 2009, S. 257). In einem vorherigen Prinzip wird deutlich, dass mit *weight* nicht das Gewicht, sondern das *Gewicht pro Volumen* also das *spezifische Gewicht* (Assis, 2010) gemeint ist: „Of solids those which, size for size, are of equal weight with a fluid will, if let down into the fluid, be immersed so that they do not project above the surface but do not sink lower“ (Archimedes, 2009, S. 255).

Diese qualitativen Ansätze der Dichte auf der Basis der Flüssigkeitsverdrängung wurden im 11. Jahrhundert von islamischen Gelehrten und später im 13. Jahrhundert auch in Europa verwendet (Hashweh, 2016). Nach Heller (1970) trugen im 17. Jahrhundert Francis Bacon (1561-1626) und Robert Boyle (1626-1691) zu eher quantitativen Betrachtungen bei. So stellte Francis Bacon mithilfe von Experimenten erstmals eine Tabelle mit spezifischen Gewichten auf, während Robert Boyle den Zusammenhang zwischen Druck und Volumen bei Gasen untersuchte. Ausgehend von Boyles Erkenntnissen konnte die Dichte als Maß für die Packung von Teilchen interpretiert werden (Heller, 1970).

Zu einer formalisierten Definition der Dichte trug Newton im 18. Jahrhundert bei, als er die Masse als Produkt von Dichte und Volumen definierte (Heller, 1970). Die Dichte wurde zu dieser Zeit somit als primär und die Masse als sekundär angesehen (Hashweh, 2016).

Zusammenfassend lassen sich drei Facetten des Dichtebegriffs anhand dieser kurzen historischen Betrachtung erkennen:

- Dichte als spezifisches Gewicht im Kontext der Flüssigkeitsverdrängung und des Auftriebs von Festkörpern in Fluiden
- Dichte als Maß für die Packung von Teilchen
- Dichte als Vorläufer und Definitionsbestandteil der Masse

F1.3 Welche empirischen Erkenntnisse zum Dichtebegriff insbesondere zu individuellen Vorstellungen von Lernenden existieren bereits in der Literatur?

Intensive Größen und proportionales Denken

Eine erste Herausforderung ergibt sich daraus, dass die Dichte eine intensive Größe ist. Sie ist somit unabhängig von der Menge eines Stoffes und es existiert eine proportionale Zuordnung zwischen Dichte und Masse sowie eine antiproportionale Beziehung zwischen Dichte und Volumen.

Fassoulopoulos et al. (2003) untersuchten in einer Studie mit 296 Lernenden im Alter zwischen 12 und 15 Jahren, inwieweit die Lernenden die Dichte als eine intensive Größe verstehen. Zu diesem Zweck sollte die Dichte des Wassers in den folgenden vier Situationen verglichen werden: 1) in einem weiten und in einem engen Gefäß, 2) im gleichen Gefäß wie vorher, nachdem etwas Wasser entfernt wurde, 3) in gleichen Gefäßen mit unterschiedlichen Wassermengen und 4) in einem Gefäß vor und nach Zugabe einer bestimmten Wassermenge. Nur etwa die Hälfte der Befragten hat richtig erkannt, dass sich die Dichte des Wassers in keiner der vier Situationen ändert. Dies begründeten die Lernenden unter anderem mit der simulierten Änderung von Masse und Volumen. Viele andere Lernende gingen hingegen von einer proportionalen Dichte-Volumen-Beziehung aus, wie eine exemplarische Antwort zu Aufgabe 3) verdeutlicht: „the density is higher in the vessel which contains more water“.

Dieses Ergebnis ist stellvertretend für weitere Untersuchungen zur Dichte (Yeend et al., 2001) oder zu anderen intensiven Größen (Nunes et al., 2003; Raviolo et al., 2021) und verdeutlicht die beiden zentralen Herausforderungen, die Nunes et al. (2003) bei intensiven Größen sehen: das simultane Berücksichtigen zweier Variablen und das antiproportionale Denken.

Zur Begegnung der Herausforderungen im Umgang mit intensiven Größen empfehlen Uhden und Gedaschko (2016) als Interpretationshilfe die *Einheitsportion*. Konkret wird die Dichte als eine Größe interpretiert, „die ausdrückt, wie viel Masse (Größe im Zähler) zu einem Einheitsvolumen (Volumen ist Größe im Nenner) eines bestimmten Stoffes gehört“ (Uhden & Gedaschko, 2016, S. 30). Das Einheitsvolumen der Dichte wird von den Autoren weiterhin als Einheitswürfel interpretiert, der in der Regel eine Kantenlänge von 1 cm hat.

Eng verbunden mit dem Umgang mit intensiven Größen ist das proportionale Denken. Dieses ist unter anderem erforderlich, wenn beispielsweise das Volumen in die Masse umgerechnet werden soll. Die mathematische Struktur dieser Aufgaben lässt sich im Allgemeinen durch die Gleichung $y = kx$ beschreiben, wobei x und y zwei zueinander proportionale Größen und k eine Proportionalitätskonstante darstellen (Wink & Ryan, 2019). Im Falle der Dichte entsprechen x und y der Masse bzw. dem Volumen und k der Dichte. Je nach Aufgabenstellung kann k als Einzelwert (z. B. $2,7 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$) oder als konkretes Wertepaar (z. B. 5,4 g und 2 cm^3) angegeben werden. Bei letzteren Aufgaben handelt es sich um *Missing-Value-Probleme*, zu denen in der Literatur zahlreiche Untersuchungen zu finden sind, in denen verschiedene Lösungsstrategien identifiziert wurden (Ben-Chaim et al., 1998; Cramer & Post, 1993; Kaput & West, 1994; J. S. Park et al., 2010). Dazu gehören u.a. das Hoch- bzw. Herunterrechnen (build-up/build-down strategy), die Verwendung der Verhältnisformel $a/b = c/d$ (cross-product strategy) oder das Zurückrechnen auf *per one* (unit-rate strategy) (Cramer & Post, 1993; Kaput & West, 1994).

Wenn k jedoch als Einzelwert angegeben wird, können die obigen Strategien nicht angewendet werden. Stattdessen muss entweder eine Umrechnung durch Umformung der Gleichung erfolgen oder der Einzelwert muss zunächst in ein konkretes Wertepaar übersetzt werden. Bislang lassen sich jedoch kaum Untersuchungen zu dieser Problematik finden. Dabei deutete sich in der Untersuchung von Akatugba und Wallace (1999) an, dass es für Lernende durchaus einen Unterschied macht, ob k als Einzelwert oder als Wertepaar angegeben wird. So waren die Lernenden nicht in der Lage, einen gegebenen Einzelwert der Dichte in ein konkretes Wertepaar zu übersetzen, weshalb sie auf die Umrechnung durch Umformung der Gleichung zurückgriffen.

Alternative Vorstellungen

Die Dichte ist ein Begriff, der stark von alternativen Vorstellungen geprägt ist. So wird die Dichte teilweise mit der Massivität oder Stabilität von Objekten gleichgesetzt (Grüß-Niehaus & Schanze, 2010). Zudem zeigt sich bei Lernenden häufig eine mangelnde Differenzierung zwischen der Dichte und dem Gewicht (Grüß-Niehaus & Schanze, 2010; Smith, 1985).

Im submikroskopischen Bereich wird die Dichte häufig als Nähe von Teilchen oder als Teilchenanzahl pro Volumen interpretiert (Grüß-Niehaus & Schanze, 2010; Lichtfeldt & Peuckert, 1997; Xu & Clarke, 2012). Mögliche Ursache dafür könnte eine durch Alltagssprachliche Begriffe, wie etwa „Bevölkerungsdichte“ oder „dichtes Gedränge“, geprägte Vorstellung zum Dichtebegriff sein, welche die Dichte intuitiv mit der Nähe von Objekten gleichsetzt (Xu & Clarke, 2012). Die Teilchenmasse wird bei diesen Vorstellungen außer Acht gelassen. Dies kann zu Schwierigkeiten führen, wenn beispielsweise Dichteunterschiede von Edelgasen erklärt werden sollen, da hier zwingend ein Bezug zur Teilchenmasse notwendig ist.

Ein weiterer Anwendungskontext der Dichte, der von alternativen Vorstellungen geprägt ist, ist die Erklärung und Vorhersage des Auftriebsverhaltens von Objekten und Stoffen in Fluiden. Ein Objekt oder Stoff steigt auf, wenn seine Dichte geringer ist als die Dichte des umgebenden Fluids. Ist die Dichte des Objekts oder des Stoffes gleich der Dichte des Fluids, so schwebt das Objekt oder der Stoff. Ein Objekt oder Stoff sinkt, wenn seine Dichte größer ist als die Dichte des umgebenden Fluids (Salim et al., 2024).¹¹

Zum Auftriebsverhalten von Stoffen und Objekten in Fluiden lässt sich eine Vielzahl an empirischen Untersuchungen finden, insbesondere zum Themenbereich des Schwimmens und Sinkens. Hierbei handelt es sich um ein schwierig zu vermittelndes Thema, das von alternativen Vorstellungen geprägt ist, die sich von der Primarstufe über die Sekundarstufe bis hin zu angehenden und praktizierenden Lehrkräften hartnäckig halten (Schaffert, 2022).

¹¹Es handelt sich hierbei um eine verkürzte Erklärung des Aufsteigens, Schwebens und Sinkens, da noch weitere physikalische Größen wie die Auftriebskraft oder der Druck für die Erklärung dieses Phänomens relevant sind. Auf eine genauere technische Erläuterung wird an dieser Stelle jedoch verzichtet und auf die Arbeit von Salim et al. (2024) verwiesen, da das Auftriebsverhalten in Fluiden nur einen Teilbereich dieser Arbeit darstellt.

Zu den am häufigsten anzutreffenden alternativen Vorstellungen gehört die Annahme, dass entweder nur die Masse oder nur das Volumen für das Auftriebsverhalten ausschlaggebend ist. Weitere Alternativvorstellungen betreffen die Annahme, dass das Aufsteigen, Schweben oder Sinken eines Objekts durch die in ihm enthaltene Luft, das Material selbst oder die Form des Objekts bestimmt wird (Grüß-Niehaus & Schanze, 2010; Salim et al., 2024; Schaffert, 2022).

Multiple Bedeutungen

In der Literatur lassen sich einige Ansätze finden, die auf verschiedene Bedeutungen des Dichtebegriffs eingehen und damit einen starken Bezug zum Grundvorstellungskonzept aufweisen. So identifizierten Xu und Clarke (2012) anhand einer Unterrichtsbeobachtung vier verschiedene Sichtweisen der Dichte, die sie der makroskopischen und submikroskopischen Ebene zuordnen:

- Dichte bedeutet Anzahl an Teilchen, die in einem Objekt enthalten sind (submikroskopisch),
- Dichte misst wie nah sich die Teilchen sind (submikroskopisch),
- Dichte bedeutet wie viel Masse ein Objekt in einem bestimmten Volumen hat (makroskopisch),
- Dichte erklärt, weshalb ein Objekt in Wasser schwimmt oder sinkt (makroskopisch).

Analog dazu formuliert Hawkes (2004) verschiedene Prinzipien, die bei der Behandlung der Dichte im Unterricht vermittelt werden sollten, wie beispielsweise „die Dichte ist ein Maß dafür, wie dicht eine Masse gepackt ist“, „dicht gepackte Teilchen erhöhen die Dichte“ oder „die Dichte eines Objekts ist unabhängig von seiner Größe oder Form“.

Die verschiedenen Bedeutungen des Dichtebegriffs sind teilweise mit Schwierigkeiten seitens der Lernenden verbunden. So zeigte sich in der Untersuchung von Xu und Clarke (2012), dass die Lernenden verschiedene der vier Sichtweisen vertraten und unsicher waren, was die Dichte genau bedeutet. Zur Begegnung dieser Schwierigkeit fordern die Autoren, dass die Verbindung zwischen den verschiedenen Sichtweisen und damit auch die Verbindung der beiden Johnstone-Ebenen miteinander verknüpft werden sollte.

Ähnlich verhält es sich mit der Verknüpfung weiterer Bedeutungen der Dichte. So fordern Zongo et al. (2023) eine stärkere Verknüpfung im Chemieunterricht zwischen der Erklärung des Auftriebsverhaltens einerseits und seiner Beziehung zu Masse und Volumen andererseits. Dies wird durch die Ergebnisse der Studie von Hashweh (2016) gestützt. Dort zeigten die Lernenden nach einer Intervention, die sich ausschließlich auf den Zusammenhang zwischen Dichte, Masse, Volumen und Struktur der Materie konzentrierte, Schwierigkeiten bei der Erklärung des Auftriebsverhaltens. Der Zusammenhang mit dem Auftrieb wurde also nicht explizit thematisiert und schien von den Schülern auch nicht implizit abgeleitet werden zu können.

F1.4 Wie und in welchen Kontexten wird der Dichtebegriff verwendet und welche Darstellungen begleiten diese Anwendungen?

F1.5 Zu welchen Klassen lassen sich die Erkenntnisse aus der Sachanalyse (F1.2 – F1.4) zusammenfassen?

Diese beiden Fragen werden zusammenfassend dargestellt, da eine Präsentation der Kontexte und Darstellungen anhand der gebildeten Klassen eine bessere Struktur bietet.

Methodisches Vorgehen

Zur Beantwortung der Fragen wurde eine systematische *Schulbuchanalyse* mittels der QIA nach Kuckartz und Rädiker (2022) (siehe Abschnitt 5.3.1) und dem Programm MAXQDA durchgeführt, um relevante Kontexte und Darstellungen zu identifizieren, in denen der Dichtebegriff verwendet wird. Dazu wurden Schulbücher ($N = 7$) verschiedener Schulformen, Verlage und Sekundarstufen ausgewählt, um einen möglichst umfassenden Einblick zu erhalten.

Die Kategorienbildung erfolgte nach einem deduktiv-induktiven Verfahren. So wurde zunächst die Autocoding-Funktion von MAXQDA mit dem Begriff „dicht“ verwendet, um relevante Segmente für die weitere Analyse zu identifizieren. Die Autocodes wurden gesichtet und irrelevante Codes, die sich nicht auf die Dichte, sondern z. B. auf die Energiedichte oder auf „luftdicht“ beziehen, aussortiert. Für Autocodes, die sich auf die Dichte bezogen, wurden Texte, Aufgaben und Darstellungen auf der gesamten Doppelseite des Schulbuchs untersucht. Wenn diese einen Bezug zur Dichte

aufwiesen, wurden sie mit den drei deduktiven Hauptkategorien *Darstellung*, *Aussage/Erläuterung* oder *Aufgabe* codiert.

Die nach diesem Verfahren identifizierten 151 Aufgaben, 218 Aussagen/Erläuterungen und 121 Darstellungen dienten als Codiereinheiten für die anschließende induktive Kategorienbildung. Diese erfolgte, wie in Kuckartz und Rädiker (2022) beschrieben, (a) durch ein zyklisches Durchlaufen der Prozesse der induktiven Bildung von Subcodes am Material, (b) durch die Systematisierung und Zusammenfassung einzelner Subcodes zu allgemeineren Subcodes und (c) durch die Codierung der Daten mithilfe der Subcodes.¹²

Die induktiv gebildeten Subcodes wurden in einem nächsten Schritt unter Berücksichtigung der vorherigen Erkenntnisse aus der historischen Begriffsentwicklung und des Literaturreviews zu übergeordneten *Klassen* zusammengefasst. Das fertige Codiersystem wurde auf seine Konsistenz und Zuverlässigkeit überprüft, indem durch eine zweite Person die insgesamt 490 Codiereinheiten anhand des Codiersystems codiert und anschließend eine Überprüfung der Inter-coder-Reliabilität durchgeführt wurde. Dies verlief in zwei Stufen:

Zunächst wurde nur ein Schulbuch (ca. 20 % der Codiereinheiten) zweiticodiert und die Inter-coder-Reliabilität bestimmt. Im Sinne des konsensuellen Codierens (Kuckartz & Rädiker, 2022) wurde sich bei Nicht-Übereinstimmungen in Diskussionen zwischen den beiden Codierenden eine gemeinsame Codierung vereinbart (siehe Anhang F) und ggf. das Codiersystem weiter ausdifferenziert. In der zweiten Stufe wurden die verbleibenden Schulbücher codiert. Der finale Codierleitfaden mit Kennzeichnung der vorgenommenen Änderungen ist dem Anhang C.1 zu entnehmen.

Die Inter-coder-Reliabilitäten sind in Tabelle 8.1 dargestellt.

Tabelle 8.1

Inter-coder-Reliabilitäten der Schulbuchanalyse

Hauptkategorie	K ₁	K ₂
Aussagen/Erläuterungen	.76	.81

¹²Für die induktive Codierung der Aufgaben wurden die Lösungsbeispiele aus den entsprechenden Lösungsbüchern herangezogen. Da für einige Schulbücher keine Lösungsbücher käuflich zu erwerben waren, wurden in diesen Fällen die Aufgaben eigenständig gelöst.

Hauptkategorie	κ_1	κ_2
Aufgaben	.75	.72
Darstellungen	.98	.98

Anmerkung. κ_1 = Kappa-Wert nach Brennan und Prediger (1981) für den ersten Codierschritt (ca. 20 % der Codiereinheiten), κ_2 = Kappa-Wert nach Brennan und Prediger (1981) für den zweiten Codierschritt (ca. 80 % der Codiereinheiten).

Diese Werte können als substanzielle bis nahezu perfekte Übereinstimmung der beiden Codierenden interpretiert werden (Landis & Koch, 1977). Daher wurden die Codes des Erstcodierenden ohne weitere Konsensualisierung für die Analysen verwendet.

Ergebnisse

Erste Klasse: Verhältnis zwischen Masse und Volumen Die erste Klasse umfasst alle Kontexte, in denen das Verhältnis zwischen Masse und Volumen im Vordergrund steht. Dies kann auf vier verschiedene Arten geschehen, wie die Beispiele zu den Subcodes für die Aussagen/Erläuterungen und die Aufgaben in Tabelle 8.2 verdeutlichen:

1. Der feste Wert des Verhältnisses kann als Charakteristikum eines Stoffes und damit die Dichte als *Stoffeigenschaft* betrachtet werden. Dies ist bei Kontexten der Fall, in denen anhand der Dichte Stoffe identifiziert oder kategorisiert werden sollen.
2. Die Bestimmung des Verhältnisses kann im Vordergrund stehen, wie es bei der rechnerischen oder experimentellen *Dichtebestimmung* der Fall ist.
3. Der Fokus kann auf der *Proportionalität* zwischen Dichte und Masse liegen, wenn beispielsweise anhand der Dichte Aussagen über die Masse eines Objekts getroffen werden sollen.
4. Der Fokus kann auf der *Antiproportionalität* zwischen Dichte und Volumen liegen, wenn beispielsweise anhand der Dichte Aussagen über das Volumen eines Objekts getroffen werden sollen.

Tabelle 8.2

Häufigkeiten und Beispiele der Subcodes für die Aussagen/Erläuterungen und Aufgaben der 1. Klasse

Subcode	Aussage/Erläuterung		Aufgabe	
	<i>f</i>	Beispiel	<i>f</i>	Beispiel
Stoff-eigen-schaft	84	„Reinstoffe sind Stoffe, die nur aus einem Stoff bestehen. Reinstoffe sind durch messbare Eigenschaften wie Siedetemperatur, Schmelztemperatur und Dichte gekennzeichnet“ (<i>PRISMA Chemie 1/2</i> , S. 65).	20	„Beschreibe die Eigenschaften des entstandenen Gases. Das Gas hat eine Dichte von $0,0084 \frac{\text{g}}{\text{L}}$; ermittle mithilfe des Periodensystems im Buch, um welches Gas es sich handelt“ (<i>Chemie heute SI</i> , S. 123).
Dichte-bestim-mung	8	„Die Dichte kann nach der Bestimmung der Masse und des Volumens einer Stoffportion berechnet werden“ (<i>PRISMA Chemie 1/2</i> , S. 65).	42	„Ein Messzylinder, der im leeren Zustand 73 g wog, wurde mit 50 cm^3 Alkohol gefüllt. Die Waage zeigte nun 112,5 g an. Berechne die Dichte des Alkohols“ (<i>Elemente Chemie 1</i> , S. 35).
Dichte-Masse-Bezie-hung	21	„Gold hat die Dichte von $19,32 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$. Befüllt man eine handelsübliche Milchflasche mit Gold, dann wiegt diese so viel wie ein fünfjähriges Kind“ (<i>Chemie 2000+</i> , S. 99).	10	„Früher hatten alle Fahrräder einen Stahlrahmen. Heute haben viele einen Rahmen aus Aluminium. Welche Vorteile hat Aluminium gegenüber Stahl?“ (<i>Elemente Chemie 1</i> , S. 159).
Dichte-Volumen-Bezie-hung	12	„Gase können leicht zusammengedrückt werden. Das Volumen wird verringert, die Dichte vergrößert sich“ (<i>Fokus Chemie</i> , S. 38).	5	„Begründe, weshalb Wasserleitungen in Parkanlagen im Winter entleert sein müssen“ (<i>Fokus Chemie</i> , S. 311).

Anmerkung. Schulbuchtitel statt Verfasser (vollständige Angaben siehe Literaturverzeichnis). *f* = absolute Häufigkeit der vergebenen Subcodes.

Diese vier Arten werden durch verschiedene Darstellungen begleitet und hervorgehoben. Am häufigsten wird die Dichte als Stoffeigenschaft durch tabellarische Steckbriefe oder Stofflisten hervorgehoben ($f = 79$), in denen entweder die Dichte neben anderen Stoffeigenschaften zur Charakterisierung eines Stoffes aufgeführt ist oder in denen die Dichten verschiedener Stoffe aufgelistet sind. Aber auch einzelne Darstellungen in Form von Graphen ($f = 2$), in denen die Masse gegen das Volumen eines oder mehrerer Stoffe aufgetragen wurde, veranschaulichen die Dichte als Stoffeigenschaft in Form einer oder mehrerer Geraden.

Die restlichen drei Arten werden durch makroskopische Darstellungen in Form von Experimenten oder Phänomenen veranschaulicht. So sind in Darstellungen zur Dichtebestimmung ($f = 8$) beispielsweise Aräometer oder Apparaturen zur Bestimmung der Dichte von Gasen dargestellt. In Darstellungen zur Proportionalität zwischen der Dichte und der Masse ($f = 4$) wird meist das Phänomen dargestellt, dass gleich große Objekte unterschiedliche Massen haben können. Die Darstellungen zur Antiproportionalität zwischen Dichte und Volumen ($f = 3$) umfassen die drei folgenden Phänomene: das Platzen einer gefrorenen Wasserflasche, die Volumenkontraktion beim Lösen eines Salzes sowie das unterschiedliche Volumen von Muskel- und Fettgewebe bei gleicher Masse.

Zweite Klasse: Auftrieb in Fluiden In der zweiten Klasse sind alle Kontexte zusammengefasst, in denen es um den Auftrieb von Stoffen und Objekten in Fluiden geht. Dazu gehören beispielsweise das Schwimmen von Eis auf Wasser, die Funktionsweise eines CO₂-Löschers oder das Schwimm- und Sinkverfahren bei der Kunststofftrennung. Beispiele für Aufgaben und Aussagen/Erläuterungen sind in der Tabelle 8.3 dargestellt.

Tabelle 8.3

Häufigkeiten und Beispiele der Subcodes für die Aussagen/Erläuterungen und Aufgaben der 2. Klasse

Subcode	Aussage/Erläuterung		Aufgabe	
	<i>f</i>	Beispiel	<i>f</i>	Beispiel
Auftrieb in Flüssigkeiten	49	„Eisberge schwimmen auf Meerwasser, d. h., festes Wasser hat eine geringere Dichte als flüssiges“ (<i>Elemente Chemie 1</i> , S. 250).	28	„Begründe, warum bei der Volumenbestimmung über Flüssigkeitsverdrängung die Dichte der Flüssigkeit kleiner sein muss als die des Festkörpers“ (<i>Chemie 2000+</i> , S. 21).
Auftrieb in Gasen	19	„Helium hat eine sehr viel geringere Dichte als Luft und wird deshalb zur Füllung von Ballonen und Luftschiffen verwendet“ (<i>PRISMA Chemie 1/2</i> , S. 190).	14	„Luftballons auf Jahrmärkten sind mit Helium gefüllt. Begründe“ (<i>Fokus Chemie</i> , S. 217).

Anmerkung. Zur besseren Nachvollziehbarkeit wird von der üblichen Zitationsweise abgewichen und statt der Verfassenden der Titel des Schulbuchs angegeben. Die vollständigen bibliografischen Angaben finden sich im Literaturverzeichnis. *f* = absolute Häufigkeit der vergebenen Subcodes.

Die jeweiligen Kontexte werden von Darstellungen begleitet, die sich fast ausschließlich auf makroskopische Phänomene und Experimente zum Auftrieb beziehen. So zeigen Darstellungen zum Auftrieb in Flüssigkeiten (*f* = 15) beispielsweise das Schwimmen und Sinken von Cola und Cola light, die Schichtung unterschiedlich temperierter Wasserschichten in Seen und Meeren oder das Schwimmen von Eis auf Wasser. Zu letzterem werden vereinzelt auch Graphen gezeigt, die die Temperaturabhängigkeit der Dichte von Wasser darstellen. Darstellungen zum Auftrieb in gasförmigen Stoffen (*f* = 6) umfassen (Heiß-)Luftballons, Zeppeline und das Umgießen von Dämpfen hoher Dichte.

Dritte Klasse: Zusammenhang zwischen Dichte und Teilchenebene Die dritte Klasse umfasst alle Kontexte, in denen Zusammenhänge zwischen der Dichte und der Teilchenebene betrachtet werden. Dabei werden Dichteänderungen und -unterschiede mithilfe der Teilchenmasse, der Teilchennähe oder der Teilchenanzahl pro Volumen erläutert (siehe Tabelle 8.4).

Tabelle 8.4

Häufigkeiten und Beispiele der Subcodes für die Aussagen/Erläuterungen und Aufgaben der 3. Klasse

Subcode	Aussage/Erläuterung		Aufgabe ^a	
	<i>f</i>	Beispiel	<i>f</i>	Beispiel
Dichte-Teilchen-nähe-Beziehung	10	„Die Wasser-Moleküle in diesen Hydrathüllen liegen enger aneinander als im reinen Wasser, wodurch das Volumen beim Lösen etwas abnimmt. Salzwasser hat also eine größere Dichte als destilliertes Wasser“ (<i>Chemie2000+</i> , S. 157).	12	„Erkläre die unterschiedlichen Dichten von Diamant und Graphit mit ihrem Aufbau“ (<i>Elemente Chemie 1</i> , S. 246).
Dichte-Teilchen-masse-Beziehung	4	„Da aber die Atome des Xenons eine größere Masse besitzen als die Atome des Heliums, ist die Gesamtmasse eines Liters Xenon größer als die Gesamtmasse eines Liters Helium. Xenon besitzt damit eine größere Dichte“ (<i>Chemie2000+</i> , S. 117).		
Dichte-Anzahl an Teilchen pro Volumen-Beziehung	1	„Ein Liter Kohlenstoffdioxid wiegt ... 1,83 g, ein Liter Helium ... nur 0,17 g.... Woher kommt der Unterschied in den Massen? Dies kann zwei Gründe haben: Entweder unterscheiden sich die Stoffmengen in den gleichen Gasvolumina“ (<i>Chemie heute SI</i> , S. 184).		

Anmerkung. Zur besseren Nachvollziehbarkeit wird von der üblichen Zitationsweise abgewichen und statt der Verfassenden der Titel des Schulbuchs angegeben. Die vollständigen bibliografischen Angaben finden sich im Literaturverzeichnis. *f* = absolute Häufigkeit der vergebenen Subcodes.

^a Bei den Aufgaben war eine Differenzierung in die verschiedenen Subcodes nicht möglich, da die Aufgaben auf verschiedene Weisen gelöst werden können.

Im Rahmen der Schulbuchanalyse konnten keine Darstellungen identifiziert werden, die sich auf den Zusammenhang zwischen Dichte und Teilchenebene beziehen. In der Literatur finden sich jedoch Darstellungen zur Dichte auf submikroskopischer Ebene, die zur Diagnose oder zur Förderung des Dichteverständnisses verwendet werden (Lichtfeldt & Peuckert, 1997; Smith, 1985). Diese sind vergleichbar mit den im Rahmen der Lernendeninterviews verwendeten Darstellungen in Schritt 5 (siehe Tabelle 8.10 in Abschnitt 8.5)

Vierte Klasse: Umrechnung zwischen Masse und Volumen In der vierten Klasse sind alle Kontexte zusammengefasst, bei denen Masse und Volumen einer Stoffportion oder eines Objekts ineinander umgerechnet werden. Beispiele für Aufgaben und Aussagen/Erläuterungen sind in Tabelle 8.5 dargestellt.

Tabelle 8.5

Häufigkeiten und Beispiele der Subcodes für die Aussagen/Erläuterungen und Aufgaben der 4. Klasse

Subcode	Aussage/Erläuterung		Aufgabe	
	<i>f</i>	Beispiel	<i>f</i>	Beispiel
$m \rightarrow V$	4	„Die Dichte ρ ist eine Stoffeigenschaft. Mithilfe der Dichte kann man die Masse einer Stoffportion in das Volumen umrechnen“ (<i>Elemente Chemie 2</i> , S. 508)	8	„Welches Volumen hat 1 kg Luft?“ (<i>Fokus Chemie</i> , S. 39)

Subcode	Aussage/Erläuterung		Aufgabe	
	<i>f</i>	Beispiel	<i>f</i>	Beispiel
$V \rightarrow m$	6	Da Wasserstoff bei 20 °C und 1013 hPa eine Dichte von 0,083 g/l hat, haben 1800 l Wasserstoff eine Masse von 150 g “ (<i>Elemente Chemie 1</i> , S. 343).	21	„Ein Taucher nimmt seine Atemluft in Druckluftflaschen mit. 12-l-Flaschen enthalten 2400 l zusammengepresste Atemluft. Berechne, welche Masse an Atemluft der Taucher tragen muss“ (<i>Chemie heute SI</i> , S. 100).

Anmerkung. Zur besseren Nachvollziehbarkeit wird von der üblichen Zitationsweise abgewichen und statt der Verfassenden der Titel des Schulbuchs angegeben. Die vollständigen bibliografischen Angaben finden sich im Literaturverzeichnis. *f* = absolute Häufigkeit der vergebenen Subcodes.

Der Kontext der Umrechnung wird kaum durch Darstellungen begleitet. Lediglich die bereits aus der ersten Klasse bekannten Graphen ($f = 2$), in denen die Masse gegen das Volumen verschiedener Stoffe aufgetragen ist, veranschaulichen sowohl die Dichte als Stoffeigenschaft als auch die Umrechnung zwischen Masse und Volumen. So kann aus den Graphen zu einer bestimmten Masse das entsprechende Volumen abgelesen werden und umgekehrt.

8.3 Schritt 3: Formulierung der Grundvorstellungen

F1.6 Welche Grundvorstellungen lassen sich auf Basis der Klassen formulieren und inwiefern lassen sich diese den Johnstone-Ebenen zuordnen?

In *Schritt 3* werden auf Basis der im vorherigen Schritt gebildeten Klassen die Grundvorstellungen formuliert und den Johnstone-Ebenen zugeordnet. Die Zuordnung erfolgt anhand der in Abschnitt 1.3 formulierten Definitionen der Johnstone-Ebenen.

Erste Grundvorstellung: Dichte als Masse eines Einheitswürfels (Würfelvorstellung) Diese Grundvorstellung lässt sich auf Basis der ersten Klasse *Verhältnis zwischen Masse und Volumen* formulieren. Das abstrakte Verhältnis wird dabei anschaulich als Masse eines Einheitswürfels interpretiert, der aufgrund der üblichen Einheit der Dichte (g/cm^3) meist eine Kantenlänge von 1 cm aufweist. Die Grundvorstellung orientiert sich damit an schultypischen Experimenten mit sogenannten Dichtewürfeln und folgt der Empfehlung von Uhden und Gedaschko (2016), die Einheitsportion als Interpretationshilfe für intensive Größen zu nutzen.

Die Grundvorstellung umfasst die folgenden inhaltlichen Facetten, die sich aus den Subcodes der entsprechenden Klasse ableiten:

- Dichte als charakteristische Stoffeigenschaft
- rechnerische und experimentelle Bestimmung der Dichte
- proportionale Beziehung zwischen der Dichte und der Masse
- antiproportionale Beziehung zwischen der Dichte und dem Volumen

Insgesamt kann die Grundvorstellung der makroskopischen Ebene zugeordnet werden, da es sich bei der Masse um eine messbare Größe und bei dem Einheitswürfel um ein makroskopisch wahrnehmbares Objekt handelt.

Zweite Grundvorstellung: Dichte als Maß für den Auftrieb (Auftriebsvorstellung) Diese Grundvorstellung lässt sich auf Basis der zweiten Klasse *Auftrieb* formulieren. Die Dichte wird dabei als ein Instrument zur Erklärung und Vorhersage des Auftriebsverhaltens von Stoffen und Objekten in Fluiden interpretiert. Dies wird durch die Betrachtung der Dichtedifferenz zwischen dem Objekt bzw. dem Stoff und dem Fluid ermöglicht.

Die Grundvorstellung umfasst die folgenden inhaltlichen Facetten, die sich aus den Subcodes der entsprechenden Klasse ableiten:

- Auftrieb in flüssigen Stoffen
- Auftrieb in gasförmigen Stoffen

Da es sich bei dem Auftrieb von Objekten und Stoffen in Fluiden um ein beobachtbares Phänomen handelt, kann auch diese Grundvorstellung der makroskopischen Ebene zugeordnet werden.

Dritte Grundvorstellung: Dichte als Gesamtteilchenmasse eines Einheitswürfels (Teilchenvorstellung) Diese Grundvorstellung lässt sich auf Basis der dritten Klasse *Zusammenhang zwischen Dichte und Teilchenebene* formulieren. Die Dichte wird hier als gesamte Masse aller Teilchen in einem Einheitswürfel interpretiert. Die Grundvorstellung umfasst die folgenden inhaltlichen Facetten, die sich aus den Subcodes der entsprechenden Klasse ableiten:

- Beziehung zwischen der Dichte und der Teilchennähe
- Beziehung zwischen der Dichte und der Teilchenmasse
- Beziehung zwischen der Dichte und der Anzahl an Teilchen pro Volumen

Insgesamt greift die Grundvorstellung den Einheitswürfel der ersten Grundvorstellung auf und betrachtet die darin enthaltenen Teilchen und deren Massen. Die Grundvorstellung stellt somit das submikroskopische Pendant zur ersten Grundvorstellung dar und kann dementsprechend auch der submikroskopischen Ebene zugeordnet werden.

Vierte Grundvorstellung: Dichte als Umrechnungsgröße (Umrechnungsvorstellung) Diese Grundvorstellung lässt sich auf Basis der vierten Klasse *Umrechnung zwischen Masse und Volumen* formulieren. Die Dichte wird hier – analog zur Grundvorstellung von Brüchen *Bruch als Operator* – als ein Umrechnungsoperator interpretiert, der auf die Masse oder das Volumen angewendet wird, um zwischen beiden Größen umrechnen zu können. Die Dichte fungiert dabei entweder als Umrechnungsfaktor bei der Berechnung der Masse eines gegebenen Volumens oder als Umrechnungsdivisor bei der Bestimmung des Volumens einer gegebenen Masse.

Die Grundvorstellung umfasst die folgenden inhaltlichen Facetten, die sich aus den Subcodes der entsprechenden Klasse ableiten:

- Umrechnung von Masse zu Volumen
- Umrechnung von Volumen zu Masse

Insgesamt wird die Grundvorstellung der Symbolebene zugeordnet, da hier der Schwerpunkt auf der Größengleichung der Dichte liegt, in der die Dichte rein mathematisch als Umrechnungsoperator betrachtet wird.

Eine Übersicht über die vier hergeleiteten Grundvorstellungen zur Dichte und deren Zuordnung zu den Johnstone-Ebenen ist in Abbildung 8.1 dargestellt.

Abbildung 8.1

Übersicht über die hergeleiteten Grundvorstellungen zur Dichte und deren Zuordnung zu den Johnstone-Ebenen



F1.7 Welche Zusammenhänge existieren zwischen den einzelnen Grundvorstellungen und inwiefern lässt sich daraus eine mögliche Reihenfolge zur Vermittlung der Grundvorstellungen formulieren?

Die Analyse der Zusammenhänge zwischen den Grundvorstellungen und die daraus mögliche Ableitung einer Reihenfolge der Vermittlung der Grundvorstellungen kann aus verschiedenen Perspektiven erfolgen, die gegeneinander abzuwägen sind.

Grundvorstellungsart Zum einen ergeben sich Zusammenhänge hinsichtlich der Art der Grundvorstellungen (siehe Abschnitt 2.2.2). So geben die Würfel- und Teilchenvorstellung eine visuelle Einsicht in die genaue Bedeutung der Dichte auf makroskopischer und submikroskopischer Ebene. Die Auftriebs- und die Umrechnungsvorstellung hingegen konzentrieren sich eher auf die Anwendung der Dichte

und können eher verbal als visuell ausgedrückt werden, da sie konkrete Verfahren zur Bestimmung des Auftriebsverhaltens bzw. zur Umrechnung von Massen und Volumina implizieren. In Analogie zu Weber (2016) und den Ausführungen von Sfard (1991) können daher die Würfel- und die Teilchenvorstellung als eher *strukturelle* und die Auftriebs- und die Umrechnungsvorstellung als eher *operationale* Grundvorstellungen eingeordnet werden. Nach Weber (2016) könnte es daher sinnvoll sein, die operationalen Grundvorstellungen vor den strukturellen Grundvorstellungen zu vermitteln.

Gleichzeitig ist zu beachten, dass sich die Grundvorstellungen nach vom Hofe und Blum (2016) auch in primäre und sekundäre einteilen lassen. So beziehen sich die Würfel- und die Auftriebsvorstellung auf lebensweltliche und erfahrbare Situationen, wie die wahrnehmbare Schwere von Gegenständen oder das sichtbare Auf- und Absteigen von Objekten. Diese Grundvorstellungen sind daher als primär einzustufen. Im Gegensatz dazu sind die Teilchenvorstellung und die Umrechnungsvorstellung auf chemische bzw. mathematische Darstellungsmittel wie Teilchendarstellungen und Gleichungen angewiesen. Diese Grundvorstellungen sind daher als sekundär einzustufen. Da die primären Grundvorstellungen den sekundären üblicherweise vorausgehen und Lernenden aufgrund des lebensweltlichen Bezugs womöglich leichter zugänglich sind, könnte eine Vermittlung der primären Grundvorstellungen vor den sekundären sinnvoll sein.

Zuordnung zu den Johnstone-Ebenen Neben der Art der Grundvorstellungen kann auch die Zuordnung der Grundvorstellungen zu den Johnstone-Ebenen die Reihenfolge der Vermittlung beeinflussen. So beginnt der Unterricht häufig auf der makroskopischen Ebene, da diese für die Lernenden wahrnehmbar und damit als leichter zugänglich erachtet wird (Johnstone, 1993; Talanquer, 2011). Darüber hinaus wird in der Literatur ein zu schneller Wechsel im Unterricht von der makroskopischen zur symbolischen Ebene kritisiert. Stattdessen sollten makroskopische Phänomene zunächst auf der submikroskopischen Ebene betrachtet werden, bevor auf die symbolische Ebene gewechselt wird (Barke & Indriyanti, 2017; Johnstone, 1993). Eine mögliche Reihenfolge der Vermittlung von Grundvorstellungen könnte demnach von der makroskopischen über die submikroskopische zur symbolischen Ebene führen.

Inhaltliche Zusammenhänge Schließlich können auch Zusammenhänge zwischen den Grundvorstellungen auf der inhaltlichen Ebene betrachtet werden. Hier ist die zentrale Bedeutung der Würfelvorstellung hervorzuheben, die sich daraus ergibt, dass nur ausgehend von dieser Grundvorstellung ein inhaltlicher Bezug zu jeder anderen Grundvorstellung hergestellt werden kann. So besteht über den Einheitswürfel ein direkter Bezug zur Teilchenvorstellung. Der Bezug zur Umrechnungsvorstellung wird insbesondere in den entwickelten Lernmaterialien deutlich. Ausgehend von der Würfelvorstellung wird dort die Umrechnungsvorstellung durch das gedankliche Wiegen von Kubikzentimeterwürfeln schrittweise hergeleitet (siehe Anhang B.4). Auch zur Auftriebsvorstellung lässt sich ein Bezug herstellen, indem die Masse eines Kubikzentimeterwürfels eines Stoffes mit der Masse eines Kubikzentimeterwürfels des Fluids verglichen wird, um das Auftriebsverhalten vorherzusagen bzw. zu erklären. Ähnlich wird in der Grundschule verfahren (Hardy et al., 2006; Salim et al., 2024).

Curriculare Anforderungen Da die Eingliederung der Grundvorstellungen in bestehende Unterrichtsstrukturen ein zentrales Kriterium für die didaktische Relevanz der Grundvorstellungen ist, sollte bei der Reihenfolge der Vermittlung der Grundvorstellungen auch die Reihenfolge in Curricula berücksichtigt werden. Wie die Beispiele für schulinterne Lehrpläne (siehe Abschnitt 8.1) zeigen, stehen zunächst (a) die Einführung der Dichte als charakteristische Stoffeigenschaft, (b) deren experimentelle Bestimmung sowie (c) das Erklären von schwimmendem Eis im Vordergrund. Erst im Anschluss daran werden submikroskopische Betrachtungen der Dichte im Kontext der Dichteanomalie vorgenommen. Dies legt ebenfalls nahe, die Grundvorstellungen der makroskopischen Ebene vor den anderen Grundvorstellungen zu vermitteln.

Fazit Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Festlegung einer idealtypischen Reihenfolge der Vermittlung von Grundvorstellungen aufgrund der unterschiedlichen Perspektiven und der Möglichkeit ihrer unterschiedlichen Gewichtung alles andere als eindeutig sein kann. Zudem können weitere Aspekte wie beispielsweise subjektive Einstellungen von Lehrkräften oder Besonderheiten von Klassen und Schulen einen Einfluss auf die Reihenfolge haben. Dennoch soll im Folgenden eine solche idealtypische Reihenfolge formuliert und anschließend be-

gründet werden, die jedoch aus den genannten Gründen nicht als dogmatisch zu betrachten ist und zur Diskussion gestellt wird. Die Reihenfolge lautet:

1. Würfelvorstellung
2. Auftriebsvorstellung
3. Teilchenvorstellung
4. Umrechnungsvorstellung

Die Vermittlung der Grundvorstellungen beginnt demnach mit den lebensweltlichen und wahrnehmbaren Vorstellungen der makroskopischen Ebene und endet mit den Vorstellungen der submikroskopischen und symbolischen Ebene, die sich auf abstraktere mathematische oder chemische Darstellungsmittel beziehen. Die formulierte Reihenfolge gibt somit den Verlauf der Johnstone-Ebenen von der makroskopischen über die submikroskopische bis zur symbolischen Ebene wieder. Gleichzeitig wird die Reihenfolge von den primären zu den sekundären Grundvorstellungen sowie die der curricularen Vorgaben erfüllt.

Die Vermittlung operationaler Grundvorstellungen vor strukturellen Grundvorstellungen ist hingegen nicht erfüllt. Um diesem Kriterium besser gerecht zu werden und damit einen möglicherweise leichteren Einstieg für die Lernenden zu ermöglichen, könnte die Position der Würfel- und der Auftriebsvorstellung getauscht werden. Aufgrund der zentralen Bedeutung der Würfelvorstellung, die als Grundlage für die anderen Grundvorstellungen angesehen werden kann, wurde sich jedoch gegen diese Reihenfolge entschieden.

8.4 Schritt 4: Präzisierung des Bezugsrahmens

F1.8 Inwiefern lässt sich der zu Beginn formulierte Bezugsrahmen weiter präzisieren?

Der zu Beginn formulierte Bezugsrahmen wurde anhand der Bildungsstandards und der Kernlehrpläne definiert. Darüber hinaus wurden die Grundvorstellungen insbesondere aus der Analyse von Schulbüchern hergeleitet, die als Konkretisierung der Vorgaben aus den Kernlehrplänen angesehen werden können. Da Schulbuchinhalte und die daraus abgeleiteten Grundvorstellungen somit innerhalb des

bestehenden Bezugsrahmens liegen und keine zusätzlichen inhaltlichen Aspekte einbringen, ist an dieser Stelle keine umfassende Präzisierung des ursprünglichen Bezugsrahmens zu erwarten.

Lediglich die notwendigen Kenntnisse, die als Voraussetzung für den Aufbau der Grundvorstellungen angesehen werden, sollten aufgrund der Würfelvorstellung durch die Grundvorstellungen zur Division (siehe Abschnitt 2.1) erweitert werden. So erfordern die Berechnung der Dichte, die Beschreibung proportionaler und antiproportionaler Beziehungen sowie die Ableitung der Umrechnungsvorstellung die Grundvorstellungen zur Division, wenn diese Prozesse vorstellungsorientiert mithilfe der Würfelvorstellung betrachtet werden (siehe Abschnitt 9.2.3 und Lernmaterialien zur Umrechnungsvorstellung im Anhang B.4).

8.5 Schritt 5: Evaluation der didaktischen Relevanz

F1.9 Inwiefern lassen sich die formulierten Grundvorstellungen als individuelle Vorstellungen der Lernenden identifizieren?

Die Beantwortung der Frage erfolgte im Rahmen einer in das vorliegende Projekt integrierten Masterarbeit (Peitz, 2022) mithilfe von Lernendeninterviews. Die Interviews wurden jedoch für den bereits zu Beginn des Abschnitts erwähnten Artikels (Meyer & Marohn, 2024) von dem Autor reanalysiert. Diese Erkenntnisse werden im Folgenden zusammenfassend dargestellt.

Methodisches Vorgehen

Zur Beantwortung der Frage wurden problemzentrierte leitfadengestützte Interviews mit Lernenden ($N = 5$) der 8. und 9. Jahrgangsstufe eines Gymnasiums in Nordrhein-Westfalen durchgeführt. Diese Form des Interviews ist insbesondere zur Erfassung individueller Vorstellungen zu einem bestimmten Gegenstand, in diesem Fall die Dichte, geeignet (Krüger et al., 2014) und stellt somit eine adäquate Methode für das gewünschte Vorhaben dar.

Die Lernenden unterschieden sich hinsichtlich ihres Geschlechts, ihrer Leistungen in Mathematik und Chemie sowie ihrer Einstellung zur Mathematik (siehe Tabelle 8.6), um ein möglichst breites Spektrum an Lernenden zu erfassen.

Tabelle 8.6

Überblick über die Stichprobe

ID	Geschlecht	Klasse	Chemienote	Mathematik- note	Einstellung zu Mathematik
S1	w	8	1	1	positiv
S2	w	8	3	4	negativ
S3	m	9	1	2	positiv
S4	w	9	2	3	negativ
S5	m	8	2	1	positiv

Die Auswahl der Jahrgangsstufen wurde bewusst getroffen, um unterschiedliche Entwicklungsstände und Vorstellungen zur Dichte zu erfassen. So wird die Dichte zwar in der Regel in der 7. oder 8. Klasse eingeführt, aber in der 9. Klasse im Zusammenhang mit der Dichteanomalie von Wasser und stöchiometrischen Berechnungen erneut thematisiert, wodurch neue oder erweiterte Vorstellungen entstehen können.

Der Interviewleitfaden setzte sich aus insgesamt 17 offenen Problemfragen zusammen, die teils auf bestimmte Grundvorstellungen abzielten und gleichzeitig Raum für individuelle Vorstellungen ließen. Um möglichst alle Facetten der jeweiligen Grundvorstellungen erfassen zu können, wurden die Problemfragen mit engem Bezug zu den Ergebnissen der Literatur- und Schulbuchanalyse entwickelt. Konkret wurde für jeden Subcode einer Klasse mindestens eine Problemfrage entwickelt, die sich, soweit möglich, an bereits in der Literatur verwendeten Diagnoseinstrumenten oder Schulbuchaufgaben orientierte. Exemplarisch ist dies in Tabelle 8.7 dargestellt.

Tabelle 8.7

Einblick in die Orientierung der Problemfragen an Ergebnissen der Literatur- und Schulbuchanalyse am Beispiel der Würfelvorstellung

Subcode	Problemfrage	Entwicklung
Stoffeigenschaft	Hat ein großes Stück Eisen die gleiche Dichte wie ein kleines Stück Eisen?	in Anlehnung an Yeend et al. (2001)
Dichtebestimmung	Wie würdest du die Dichte von diesem Würfel bestimmen?	in Anlehnung an Aufgabe 2 (Asselborn et al., 2017, S. 31)
Dichte-Masse-Beziehung	Wir haben zwei gleich <i>große</i> Würfel A und B mit $\rho_A = 2 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ und $\rho_B = 4 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$. Woran kannst du den Dichteunterschied bei den Würfeln erkennen?	eigens entwickelt
Dichte-Volumen-Beziehung	Wir haben zwei gleich <i>schwere</i> Würfel A und B mit $\rho_A = 2 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ und $\rho_B = 4 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$. Woran kannst du den Dichteunterschied bei den Würfeln erkennen?	eigens entwickelt

Anmerkung. Die Beispiele beziehen sich auf die Klasse *Verhältnis zwischen Masse und Volumen* und die daraus abgeleitete Grundvorstellung *Dichte als Masse eines Einheitswürfels*.

Dieses Vorgehen scheint insofern angemessen zur Erhebung der Grundvorstellungen bei Lernenden, da die Erkenntnisse aus der Literatur und die Schulbuchaufgaben ebenfalls bei der Herleitung der Grundvorstellungen eine zentrale Rolle gespielt haben.

Im Folgenden wird ein Überblick über die grundlegende Struktur der Interviews gegeben. Der vollständige Interviewleitfaden ist dem Anhang zu entnehmen (siehe Anhang D.1).

- Einführung und Sondierungsfragen
- Auftriebsvorstellung
 - Einstieg über Vorhersage des Auftriebsverhaltens von Objekten in Wasser anhand von zwei Bildimpulsen

- Erklärung des Aufsteigens eines Heliumballons in der Luft
- Alle Vorstellungen: Freie Assoziation zum Begriff „Dichte“
- Würfelvorstellung
 - Bestimmung der Dichte eines Würfels
 - Interpretation einer Dichteangabe
 - Feststellung des Dichteunterschieds bei zwei gleich *großen* Würfeln (Dichte-Masse-Beziehung)
 - Feststellung des Dichteunterschieds bei zwei gleich *schweren* Würfeln (Dichte-Volumen-Beziehung)
 - Vergleich der Dichte von zwei unterschiedlich großen Eisenstücken
- Teilchenvorstellung
 - Explizite Überleitung zur Teilchenebene
 - Erklärung der Dichteunterschiede von Wasser bei unterschiedlichen Aggregatzuständen durch Anfertigen einer Zeichnung
 - Erklärung der Dichteunterschiede von Eisen und Aluminium durch Anfertigen einer Zeichnung
 - Vergleich der Dichte von Teilchendarstellungen anhand von vier Bildimpulsen
- Umrechnungsvorstellung
 - Umrechnung von Masse nach Volumen und Volumen nach Masse anhand von zwei *kontextorientierten* Aufgaben
 - Umrechnung von Masse nach Volumen und Volumen nach Masse anhand von zwei *fachimmanenten* Aufgaben

Die Interviews dauerten ca. 30 Minuten. Sie wurden mit Diktiergeräten aufgezeichnet, nach den Regeln der inhaltlichen-semantischen Transkription von Dresing und Pehl (2018) transkribiert und inhaltsanalytisch ausgewertet. Die folgende Darstellung und Analyse der Ergebnisse bezieht sich jedoch auf die eingangs erwähnte Reanalyse des Autors.

Darstellung und Auswertung der Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse für jede Grundvorstellung einzeln dargestellt. Die Interviews sind als exemplarische Erhebungen zu verstehen, die einen ersten Einblick darin geben, inwiefern sich die formulierten Grundvorstellungen bei Lernenden identifizieren lassen. Diese Betrachtungen können erste Hinweise auf die didaktische Relevanz und mögliche Ausdifferenzierungen der Grundvorstellungen liefern.

Entsprechend sind auch die präsentierten Ergebnisse als exemplarisch zu interpretieren. Es werden Kernaussagen der Lernenden zu ausgewählten Fragen vorgestellt, welche die individuellen Vorstellungen verdeutlichen. Dies ermöglicht es, die Übereinstimmung der individuellen Vorstellungen der Lernenden mit der jeweiligen Grundvorstellung zu analysieren.

Würfelvorstellung Die Kernaussagen der Lernenden zu zwei Problemfragen der Würfelvorstellung sind in Tabelle 8.8 dargestellt.

Tabelle 8.8

Kernaussagen der Lernenden zu Problemfragen der Würfelvorstellung

ID	Problemfrage	
	(1) Die Dichte von Aluminium (Al) beträgt $2,74 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$. Was bedeutet dieser Wert für dich?	(2) Du hast ein großes und ein kleines Stück Eisen. Haben beide die gleiche Dichte?
S1	„Kubikzentimeter, so zusagen, dass das Volumen $2,74 \text{ g ...}$, weil Zentimeter hoch drei ist ja das Volumen mit Gramm $2,74$ in der Dichte hat.“	„Ja ..., weil ... beides halt das gleiche Metall ist oder ... der gleiche Stoff ist und dadurch dann auch die gleiche Dichte.“

8 Grundvorstellungen zum Dichtebegriff und Zuordnung zu den Johnstone-Ebenen

Problemfrage		
ID	(1) Die Dichte von Aluminium (Al) beträgt $2,74 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$. Was bedeutet dieser Wert für dich?	(2) Du hast ein großes und ein kleines Stück Eisen. Haben beide die gleiche Dichte?
S2	„Ich verbind das grad so auch mit dem Thema bei uns im Unterricht, also mit Schalenmodell und so was. Aber ich glaube, das hat nicht so viel damit zu tun, deswegen keine Ahnung.“	„Ich glaube nicht, weil die Stücke haben ja nicht das gleiche Volumen und die gleiche Masse und ... Masse und Volumen hat ja immer einen Zusammenhang mit der Dichte.... Ich glaube dann kann es nicht sein, dass es die gleiche Dichte hat, wenn es nicht die gleiche Masse und das gleiche Volumen ist.“
S3	„Also für ein Metall ist das relativ leicht würde ich sagen. Also Al kennt man ja auch als relativ leichtes Material ... das ist ... zweieinhalb mal schwerer als Wasser.“	„Schon ..., wenn man von jedem Eisen ein Kubikzentimeter oder was auch immer rausnehmen würde, würde man feststellen, dass es gleich schwer ist. Deswegen ist das Verhältnis quasi gleich. Also auch, wenn das eine Stück größer ist, wiegt es dann halt so und so viel mehr, wie es auch größer ist als das Andere.“
S4	„2,74 g. Das ist nicht sonderlich schwer würde ich sagen. Das ist schon relativ leicht. Pro Kubikzentimeter.... Das ist auf jeden Fall nicht schwer, dass es in der Hand schwer wäre. Aber wie groß das ist, kann ich mir jetzt nicht genau vorstellen.“	„Die können gar nicht gleich sein, weil die Dichte berechnet man ja Masse durch Volumen und das Volumen ist ja zumindest bei beiden unterschiedlich. Es kann ja gar nicht das gleiche Ergebnis rauskommen.“

Problemfrage		
ID	(1) Die Dichte von Aluminium (Al) beträgt $2,74 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$. Was bedeutet dieser Wert für dich?	(2) Du hast ein großes und ein kleines Stück Eisen. Haben beide die gleiche Dichte?
S5	„Ich glaube, das ist, wenn ein Block Al ein Zentimeter lang ist in jede Richtung, dann wiegt dieser glaub ich 2,74 g.“	„Ich glaube, die beiden haben die gleiche Dichte. Wenn man es auf Gramm pro Kubikzentimeter rechnet. Aber der ist halt schwerer, weil die halt die gleiche Dichte haben.... Wenn der zum Beispiel fünf Kubikzentimeter und der einen Kubikzentimeter. Dann wiegt der auch fünfmal so viel, wie der. Und wenn man das hier beides durch fünf rechnet, die Gramm- und Kubikzentimeterzahl des Größeren, dann kommt man auf das Kleinere.“

In den Antworten zur Problemfrage (2) wird ersichtlich, dass S3 und S5 die Würfelvorstellung verwendeten, um die Unabhängigkeit der Dichte von der Menge eines Stoffes zu erklären. Beide argumentierten jedoch auf unterschiedliche Weise. Während S3 eine feste Volumeneinheit gedanklich aus beiden Stücken herausschnitt, brachte S5 anhand eines Beispiels das größere Stück auf das Volumen des kleineren Stücks. Auch wenn es unklar bleibt, ob die Lernenden wirklich in Form eines konkreten Würfels gedacht haben, wurde dennoch der Kern der Würfelvorstellung getroffen. Die Antwort von S5 zur Frage (1) zeigt ebenfalls deutlich die Würfelvorstellung.

Bei den verbliebenen Lernenden lassen sich keine Anzeichen der Würfelvorstellung erkennen. S2 und S4 stellten in der Antwort zu (2) zwar einen Zusammenhang zwischen Dichte, Masse und Volumen her, das Betrachten einer festen Volumeneinheit blieb allerdings aus.

Auftriebsvorstellung Die Kernaussagen der Lernenden zu den Problemfragen der Auftriebsvorstellung sind in Tabelle 8.9 dargestellt.

Tabelle 8.9

Kernaussagen der Lernenden zu Problemfragen der Auftriebsvorstellung

ID	Problemfrage		
	(1) Ein Eichenholz (EH)-Würfel ($m = 0,675 \text{ g}$, $V = 1 \text{ cm}^3$) und Aluminium (Al)-Würfel ($m = 2,7 \text{ g}$, $V = 1 \text{ cm}^3$) werden ins Wasser gegeben. Welcher der Würfel schwimmt? Begründe.	(2) Ein Holzwürfel ($m = 1,35 \text{ g}$, $V = 2 \text{ cm}^3$) und Al-Würfel ($m = 1,35 \text{ g}$, $V = 0,5 \text{ cm}^3$) werden ins Wasser gegeben. Welcher der Würfel schwimmt? Begründe.	(3) Wieso fliegt ein mit Helium (He) gefüllter Ballon in der Luft?
S1	„Er wiegt wesentlich mehr und hat nicht so eine hohe Dichte.“ (I: „Der Al-Würfel oder der Holzwürfel?“) „Der EH-Würfel hat nicht so eine hohe Dichte wie der Al-Würfel und dadurch würde er sinken.“	„Ich würde noch immer sagen das der EH-Würfel trotzdem schwimmen würde und Al wieder nicht, weil halt wirklich einfach EH nicht so eine hohe Dichte hat wie Al. “	„Weil es leichter ist als die/ also als der Sauerstoff so zu sagen. Also als unsere normale Luft.“ (I: „Hast du da sonst noch irgendwas zum Hinzufügen?“) „Ja, wieder vielleicht sehr wahrscheinlich das mit der Dichte, dass Sauerstoff eine höhere Dichte hat als He.“
S2	„Weil Holz sowieso oft schwimmt.“ (I: „Und der Al-Würfel?“) „Der ist gar nicht so leicht. Ich glaube, dass der einfach nicht schwimmen wird.“	„Die sind zwar gleich schwer, aber sind auch aus verschiedenem Material.... Ich weiß nicht.“	„Durch die heiße Luft ist der Ballon/ wird der ja oben aufgeplustert und ich glaub das hat viel mit der Luft ... ne, keine Ahnung.“

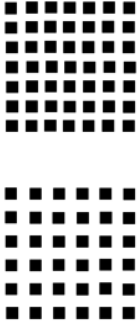
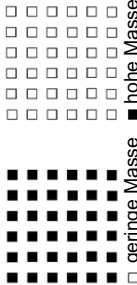
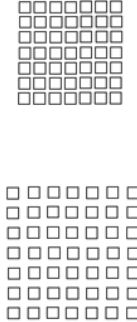
Problemfrage			
ID	(1) Ein Eichenholz (EH)-Würfel ($m = 0,675 \text{ g}$, $V = 1 \text{ cm}^3$) und Aluminium (Al)-Würfel ($m = 2,7 \text{ g}$, $V = 1 \text{ cm}^3$) werden ins Wasser gegeben. Welcher der Würfel schwimmt? Begründe.	(2) Ein Holzwürfel ($m = 1,35 \text{ g}$, $V = 2 \text{ cm}^3$) und Al-Würfel ($m = 1,35 \text{ g}$, $V = 0,5 \text{ cm}^3$) werden ins Wasser gegeben. Welcher der Würfel schwimmt? Begründe.	(3) Wieso fliegt ein mit Helium (He) gefüllter Ballon in der Luft?
S3	„Der Al-Würfel ist viel schwerer und ist auch schwerer als das Wasser.“ (I: „Und der Holzwürfel?“) „Der ist leichter.“	„Die sind zwar beide gleich schwer, aber der EH-Würfel hat ein viel größeres Volumen. Von daher ist der eigentlich trotzdem leichter?“	„Weil He eine geringere Dichte hat als die Umgebungsluft.“
S4	„Weil das Al erstens schwerer ist und Holz an sich eigentlich schwimmt.“	„Weil der Al ist schwerer als der Andere. Aber ich glaube, der EH ist immer noch aus Holz und ... obwohl der genauso schwer ist, trotzdem oben bleibt, weil Al ja viel dichter ist als Holz.“	—
S5	„Weil Al eine höhere Dichte hat, glaub ich. Und weil Metalle schwimmen, glaub ich normalerweise.“ (I: „Und EH?“) „Ja, ich weiß es halt aus Erfahrung, dass Holz untergeht ... und weil es eine niedrigere Dichte hat.“	„Ja, jetzt ist es das Gleiche, weil Al noch immer eine höhere Dichte hat.“	„Entweder weil die zur Wärme streben vielleicht oder wegen dem He, weil das vielleicht keine Erdanziehungskraft hat, weil das quasi fast nichts ist, glaub ich.“

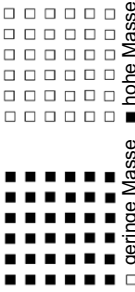
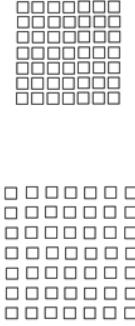
Es wird deutlich, dass die Lernenden die Auftriebsvorstellung gar nicht oder nur teilweise entwickelt haben. So lässt sich bei S2 die Auftriebsvorstellung nicht identifizieren, da diese entweder keine Begründung für das Auftriebsverhalten angab oder mit der Masse und Alltagserfahrungen argumentierte. Bei den verbliebenen Lernenden lässt sich die Auftriebsvorstellung ansatzweise erkennen, da diese vereinzelt mit der Dichte argumentierten. Allerdings argumentierte keine Person bei allen drei Problemfragen mit der Dichte. Teilweise wurden neben der Dichte auch weitere Begründungen über die Masse (S1) oder den Stoff (S5) angeführt. Eine vollständig entwickelte Auftriebsvorstellung lässt sich somit bei keiner Person erkennen.

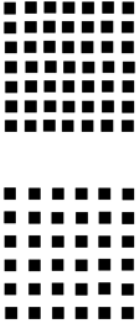
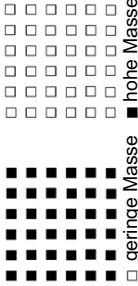
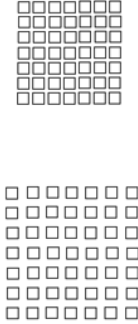
Weiterhin ist anzumerken, dass alle Lernenden die Argumentationsweise zwischen den Fragen zum Auftrieb in flüssigen Stoffen [(1) und (2)] und denen zum Auftrieb in gasförmigen Stoffen (3) wechselten. Der Aggregatzustand des Fluides scheint somit einen Einfluss auf die Aktivierbarkeit oder die Entwicklung von Vorstellungen zu haben.

Teilchenvorstellung In der Tabelle 8.10 sind die Begründungen der Lernenden zu Vergleichen verschiedener Dichten auf der Teilchenebene dargestellt.

Tabelle 8.10*Begründungen der Lernenden zu Dichtevergleichen auf der Teilchenebene*

Problemfrage: Wo is jeweils die größere Dichte dargestellt?				
ID	(1)	(2)	(3)	(4)
S1		 ☐ geringe Masse ☒ hohe Masse		
S1	„Weil es einfach nicht so viele Abstände/ also nicht so große Abstände und auch mehr Quadrate auf dem gleichen Raum sind.“	„Ich würde jetzt theoretisch hätten sie jetzt beide die gleichen Abstände. Und dadurch würde ich halt sagen, die gleiche Dichte haben.“	„Der Unterschied ist, dass die Form halt kleiner ist, aber dadurch hat sie halt keine weniger große Dichte.“	„Weil es wesentlich kleinere Abstände hat als das Linke.“
S2	„Weil sie näher beieinander sind und so dichter ist.“	„Weniger Masse bedeutet ja auch weniger Dichte denke ich und je mehr Masse und mehr Volumen ist auch mehr Dichte.“	„Hier glaub ich sind die Abstände so gar nicht so weit, aber es ist kleiner. Deshalb denk ich, dass das dichter ist.“	„Weil die Abstände zwischen den vier Ecken kleiner sind und dass es somit auch dichter ist.“

Problemfrage: Wo is jeweils die größere Dichte dargestellt?				
ID	(1)	(2)	(3)	(4)
S3		 geringe Masse hohe Masse		
	„Da sind mehr Teilchen auf dem selben Raum und wenn man jetzt davon ausgeht, dass die Teilchen gleich schwer sind, dann ist das dichter.“	„Die sind quasi von der Anzahl gleich. Aber hier steht, dass die weißen Teilchen weniger Masse haben als die Schwarzen und deswegen sind die dichter.“	„Die haben den gleichen Abstand. Rechts sind zwar insgesamt weniger, aber auf einer kleineren Fläche ..., das heißt, wenn man die hier auch wegnehmen würde, wäre es auch dasselbe, deswegen müssten die gleich sein.“	„Da sind auch mehr Teilchen auf dem kleineren Raum und deswegen ist das dichter.“
S4	„Das ist jetzt quasi genau das, was ich mir denke. Wenn das nicht so dicht ist, dass das dann ein bisschen weiter auseinander ist. Wenn es dichter ist, enger aneinander ist.“	„Weil da ja die Masse größer ist und wenn man eine größere Masse durch das Volumen teilt, kommt eine größere Dichte raus.“	„Da ist der Abstand glaub ich relativ gleich. Der eine ist halt größer, das heißt, dass die Masse dann noch größer ist. Deswegen glaub ich, dass der größere Würfel dichter ist.“	„Ja, da sind die viel näher beieinander. Deshalb finde ich das ist dichter.“

Problemfrage: Wo is jeweils die größere Dichte dargestellt?				
ID	(1)	(2)	(3)	(4)
S5	„Das Rechte hat eine höhere Dichte, da hier auf der gleichen Fläche mehr Teilchen sind.“ 	„Da das, wie da steht, weniger Masse hat und wenn man das dann ausrechnen würde, kommt dann hier eine höhere Dichte raus.“  □ geringe Masse ■ hohe Masse	„Wenn das hier genauso viele Teilchen hätte wie das, dann würde es glaub ich gleich viel wiegen.“ 	„Weil da die einzelnen Teilchen näher beieinander sind.“ 

Es wird deutlich, dass die Lernenden häufig mit dem Abstand oder der Anzahl der Teilchen argumentierten. Die Teilchenvorstellung lässt sich lediglich bei S3 identifizieren. So berücksichtigte S3 bei Aufgabe (1) sowohl die Anzahl der Teilchen „auf dem selben Raum“ sowie deren Masse, was der formulierten Grundvorstellung entspricht.

Weiterhin zeigt sich analog zur Auftriebsvorstellung bei einigen Lernenden ein Wechsel in der Argumentationsweise. So argumentierten S2 und S4 bei den Aufgaben (1) und (4) mit dem Abstand der Teilchen, während sie bei den Aufgaben (2) und (3) einen Bezug zu Massen- und Volumenänderungen herstellten. Dies scheint durch den identischen Abstand der Teilchen in Aufgabe (2) und (3) ausgelöst zu werden, der die Lernenden dazu veranlasst, alternative Erklärungen zu suchen. Die formulierte Grundvorstellung könnten sich in diesen Fällen als eine fruchtbare Alternative erweisen.

Umrechnungsvorstellung Drei der fünf Lernenden waren in der Lage, Ideen zur Lösung der vier gestellten Umrechnungsaufgaben zu entwickeln. Sie rechneten dabei alle vorstellungsorientiert das Volumen in die Masse um, indem sie zunächst die Dichte mit Hilfe der Würfelvorstellung in ein Wertepaar übersetzten und anschließend die Umrechnung mit der Grundvorstellung der Multiplikation als Skalierung (vom Hofe & Roth, 2023) vornahmen. Beispielsweise erklärte S5 seine Lösung zur Frage nach der Masse eines Quaders ($V = 90 \text{ cm}^3$, $\rho = 4,5 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$) wie folgt: „Dann wusste ich, 1 cm^3 sind 4,5 g und deswegen habe ich da es 90 und nicht 1 cm^3 sind 90 mal 4,5 gerechnet.“

Die umgekehrte Umrechnung von Masse in Volumen gelang lediglich S3. S1 und S5 berechneten fälschlicherweise das Produkt aus Masse und Dichte, um das Volumen eines Quaders zu ermitteln ($m = 90 \text{ g}$, $\rho = 1,5 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$). S5 erkannte seinen Fehler zwar, konnte aber keine alternative Lösung finden. Insgesamt kann daraus geschlossen werden, dass S3 die Umrechnungsvorstellung entwickelt, S1 und S5 teilweise entwickelt und S2 und S4 nicht entwickelt haben.

Diskussion und Fazit

Die Ergebnisse der Interviews konnten einen exemplarischen Einblick darin geben, inwiefern sich die formulierten Grundvorstellungen als individuelle Vorstellungen

bei Lernenden identifizieren lassen. Es zeigte sich, dass jede der vier Grundvorstellungen zumindest teilweise bei einzelnen Lernenden identifiziert werden konnten und ein Erklärungsmodell für deren Handeln darstellten. Dies kann als ein erstes Indiz für die didaktische Relevanz der Grundvorstellungen interpretiert werden. Gleichzeitig hat sich gezeigt dass bei vielen Lernenden statt der Grundvorstellung alternative Vorstellungen entwickelt haben, die bereits in der Literatur beschrieben wurden. Dazu gehört beispielsweise die Interpretation der Dichte als Maß für die Nähe von Teilchen (Lichtfeldt & Peuckert, 1997) oder das Erklären des Auftriebsverhaltens mithilfe der Masse (Größ-Niehaus & Schanze, 2010). Da diese Vorstellungen bereits bei der Herleitung der Grundvorstellungen berücksichtigt wurden, ergeben sich daraus keine Ausdifferenzierungen der Grundvorstellungen.

F1.10 Inwieweit bewähren sich die Grundvorstellungen in der Unterrichtsgestaltung?

Eine Beantwortung der Forschungsfrage ist an dieser Stelle noch nicht möglich, sondern ergibt sich vielmehr aus den Erkenntnissen der folgenden Kapitel. Aus diesem Grund wird die Frage abschließend in Kapitel 10 beantwortet.

Für eine Darlegung des potenziellen Nutzens der Grundvorstellungen in der Unterrichtsgestaltung auf theoretisch-argumentativer Basis sei auf Meyer und Marohn (2024) verwiesen.

9 Das Unterrichtskonzept ma_Gic mit begleitenden Lernmaterialien

In diesem Kapitel wird die Entwicklung der Unterrichtskonzeption mit begleitenden Lernmaterialien dargestellt und damit folgende Forschungsfrage beantwortet:

F2 In welcher Weise lässt sich eine Unterrichtskonzeption mit begleitenden Lernmaterialien zur Entwicklung der identifizierten Grundvorstellungen gestalten?

Dazu werden zunächst die der Entwicklung zugrunde liegenden Designprinzipien unter Rückbezug zum theoretischen Hintergrund begründet ausgewählt (siehe Abschnitt 9.1). Anschließend erfolgt die Konkretisierung der Designprinzipien, indem die entwickelte Unterrichtskonzeption und dazugehörige Lernmaterialien präsentiert werden (siehe Abschnitt 9.2). Letztere werden exemplarisch für die Würfel- und Auftriebsvorstellung vorgestellt. Die vollständigen Lernmaterialien sind im Anhang B zu finden. Zuletzt wird ein Einblick in die iterative Optimierung der Lernmaterialien gegeben (siehe Abschnitt 9.3).

Zu Beginn jedes folgenden Abschnitts werden die Subfragen (F2.1 bis F2.4) aufgeführt, die in dem jeweiligen Abschnitt beantwortet werden.

9.1 Designprinzipien

F2.1 Welche Designprinzipien sollen die Materialien erfüllen?

Designprinzip 1 (DP1): Genetisches Lernen Wie bereits in Abschnitt 3.3.2 erläutert, stellt das genetische Lernen ein geeignetes Prinzip zur Vermittlung von Grundvorstellungen dar, da es

1. konstruktivistische Ansätze aufgreift und damit einen fruchtbaren Rahmen zur Entwicklung von Vorstellungen schafft,
2. einen starken Bezug zu problemorientierten Lernen aufweist, das sich positiv auf die Vorstellungsentwicklung auswirken kann,
3. bereits erfolgreich in der Schulbuchreihe *mathewerkstatt* zur vorstellungsorientierten Vermittlung mathematischer Begriffe angewendet wird.

Um das Prinzip des Genetischen Lernens zu erfüllen, sollten die Lernmaterialien den Lernenden durch geeignete Impulse das eigenständige Entdecken und Nachempfinden von Begriffen und Zusammenhängen ermöglichen. Im Einklang mit der konstruktivistischen Perspektive (siehe Abschnitt 3.1) sowie Befunden zum entdeckenden Lernen (siehe Abschnitt 3.3.2) sollten die Lernenden dabei durch geeignete Strukturierungsmaßnahmen unterstützt werden. Zudem sollte dieser Prozess durch Kernfragen gerahmt werden, die plausible Fragestellungen an die Erfahrungswelt der Lernenden darstellen. Die Kernfragen sollten den Prozess in der Vor-schau strukturieren und in der Rückschau mithilfe der nachempfundenen Begriffe und Zusammenhänge beantwortet werden können (siehe Abschnitt 3.3.2).

Designprinzip 2 (DP2): Verwendung und Wechsel zwischen verschiedenen Darstellungen Das Prinzip des Darstellungswechsels wurde in Abschnitt 3.3.3 als zentral für die adäquate Begriffs- und Vorstellungsentwicklung insbesondere in der Mathematik und den Naturwissenschaften beschrieben. Dies wurde mit der CTML und der Besonderheit theoretischer Begriffe begründet.

Für die Entwicklung von Grundvorstellungen im Speziellen stellt die Verwendung und der Wechsel zwischen verschiedenen Darstellungen ein geeignetes Prinzip dar (siehe Abschnitt 3.3.3), da

1. Grundvorstellungen beim Darstellungswechsel benötigt und durch diesen trainiert werden können,
2. Grundvorstellungen auf verschiedene Arten mental repräsentiert sein können und diese Arten strukturelle Gemeinsamkeiten mit den Darstellungen aufweisen,
3. Grundvorstellungen in manchen Darstellungen besser erkenntlich sein können als in anderen,

4. Kommunikation mit und über verschiedene Darstellungen Spuren im Kopf hinterlassen und sozio-kognitive Konflikte auslösen kann,
5. ein Wechsel in eine Darstellungsebene mit geringerem Abstraktionsgrad den Zugang für Lernende zum Lerninhalt ermöglichen oder erleichtern kann.

Die Lernmaterialien sollten demnach verschiedene Darstellungen zur Vermittlung der Grundvorstellungen verwenden und Wechsel zwischen diesen initiieren.

Designprinzip 3 (DP3): Anknüpfen an individuelle Vorstellungen und Erfahrungen Dieses Designprinzip folgt aus der konstruktivistischen Sichtweise auf das Lernen, nach der Lernen auch als Vorstellungsentwicklung betrachtet werden kann, die stets auf Basis individueller Vorstellungen und Erfahrungen stattfindet (siehe Abschnitt 3.1). Damit eine Vorstellungsentwicklung in Richtung der Grundvorstellungen ermöglicht werden kann, sollten die Lernmaterialien demnach an individuelle Vorstellungen und Erfahrungen der Lernenden anknüpfen.

Designprinzip 4 (DP4): Sukzessive Vernetzung von Grundvorstellungen und Johnstone-Ebenen In Abschnitt 2.2.3 wurde dargelegt, dass Grundvorstellungen nicht nur isoliert betrachtet, sondern miteinander vernetzt werden müssen, um ein Grundverständnis eines Begriffes zu erlangen. Analog wurde in Abschnitt 1.3 die Notwendigkeit der Vernetzung der Johnstone-Ebenen beschrieben. Allerdings besteht die Gefahr einer Vermischung von Ebenen sowie einer kognitiven Überlastung der Lernenden, wenn alle Ebenen gleichzeitig im Unterricht betrachtet werden und keine transparente Trennung zwischen diesen vorgenommen wird.

Aufgrund der Zuordnung der Grundvorstellungen zu den Johnstone-Ebenen ergibt sich somit folgende Anforderung an die Lernmaterialien: Die Lernmaterialien sollten sowohl die Grundvorstellungen als auch die Johnstone-Ebenen sukzessiv miteinander vernetzen, um Lernenden nicht zu überfordern. Das bedeutet, dass die Grundvorstellungen und Johnstone-Ebenen zu Beginn eher isoliert betrachtet und nur wenige Verbindungen transparent aufgezeigt werden sollten. Erst in einem nächsten Schritt sollte dann eine umfassende Vernetzung der Grundvorstellungen und Johnstone-Ebenen stattfinden.

Designprinzip 5 (DP5): Explikation von Grundvorstellungen Dass die Explikation von zu vermittelnden Lerninhalten förderlich sein kann, ist bereits aus verschiedenen Bereichen bekannt, wie beispielsweise der Vermittlung heuristischer Strategien zur Lösung mathematischer Probleme. So geht König (1992) davon aus, dass eine implizite Vermittlung heuristischer Strategien, zum Beispiel durch Vorbildwirkung, nicht ausreicht, sondern dass die Strategien während ihrer Anwendung explizit gemacht werden müssen.

In einer Studie verglich Schoenfeld (1979) implizites und explizites Training heuristischer Strategien in einem Kontrollgruppendesign. Beide Gruppen wurden mit Aufgaben trainiert, die auf die heuristischen Strategien zugeschnitten waren. Während der Gruppe mit dem impliziten Training lediglich die Lösungen zu den Aufgaben zur Verfügung gestellt wurden, erhielt die Gruppe mit dem expliziten Training zusätzlich eine Liste mit den heuristischen Strategien sowie strategische Kommentare zu den Lösungen, in denen die Heuristiken hervorgehoben wurden. Die Gruppe mit dem expliziten Training schnitt deutlich besser ab als die Gruppe mit dem impliziten Training. Zum gleichen Ergebnis kam B. Rott und Gawlick (2014) in einer ähnlichen Untersuchung mit einer größeren Stichprobe. Das bessere Abschneiden der explizit trainierten Gruppe erklärt Schoenfeld (1985) in einem späteren Verweis wie folgt:

[T]he explicit mention of the heuristic techniques served to bring those skills to the students' conscious attention and to help them codify and reorganize their existing knowledge in such a way that those skills could now be accessed and used more readily. (Schoenfeld, 1985, S. 209)

Trotz dieser vielversprechenden Ergebnisse im Bereich der Vermittlung heuristischer Strategien ist es bei der Vermittlung von Grundvorstellungen bislang unüblich, Grundvorstellungen in Form von Verbalisierungen oder konkreten Bezeichnungen zu explizieren und damit für die Lernenden transparent zu machen.

Empirische Erkenntnisse über den Nutzen einer Explikation von Grundvorstellungen liegen daher noch nicht vor. Dennoch wird eine Explikation der Grundvorstellungen bei der Entwicklung der Unterrichtskonzeption angestrebt, da sie - analog zu den Ausführungen von Schoenfeld (1985) - als kognitiver Anker dienen könnte, der das Erinnern und Abrufen der Grundvorstellungen erleichtert. Darüber hinaus könnte eine Explikation in Form einer konkreten Bezeichnung von Grundvorstel-

lungen den Austausch über Grundvorstellungen zwischen Lehrenden und Lernenden erleichtern und als gemeinsame Sprache dienen, die es ermöglicht, mathematische Ideen präzise und verständlich auszudrücken und zu diskutieren.

9.2 Konkretisierung der Designprinzipien

F2.2 Welche Strukturierung ermöglicht die Umsetzung der Designprinzipien?

F2.3 In welcher Weise lassen sich die Designprinzipien konkret umsetzen?

9.2.1 Phasierung

In Bezug auf die Realisierung der Designprinzipien wurde das im KOSIMA-Forschungsprojekt entwickelte und in der Schulbuchreihe *mathewerkstatt* implementierte Strukturierungsmodell als adäquate Grundlage erachtet (siehe Abschnitt 3.5). Dies lässt sich damit begründen, dass sich das Modell bereits als erfolgreich zur vorstellungsorientierten Vermittlung mathematischer Inhalte nach dem genetischen Lernen (DP1) sowie zur Integration weiterer Designprinzipien, wie beispielsweise der Verwendung und Vernetzung verschiedener Darstellungen (DP2) oder der Orientierung an individuellen Vorstellungen (DP3), erwiesen hat (Prediger et al., 2021).

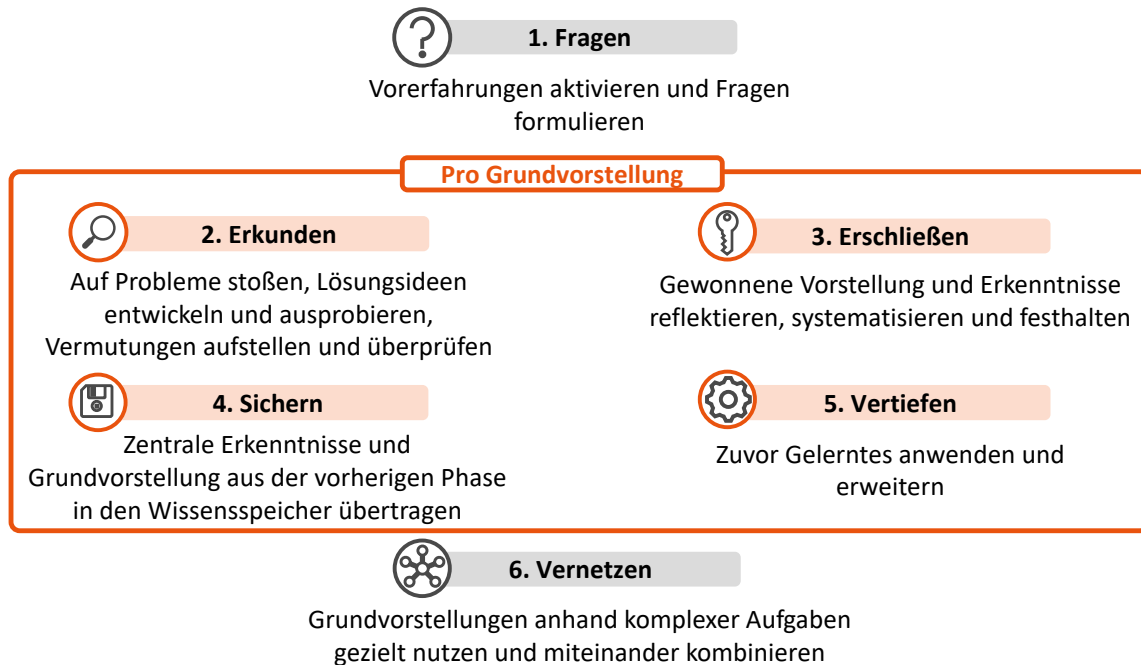
Auf Basis des Strukturierungsmodells wurde eine Strukturierung für das Unterrichtskonzept *ma_Gic* entwickelt, das die Verwirklichung aller Designprinzipien ermöglichen soll. Dies wird im Folgenden vorgestellt.

Das Unterrichtskonzept *ma_Gic* gliedert sich in insgesamt 6 Phasen (siehe Abbildung 9.1), die die vier Kernprozesse des Strukturierungsmodells – Anknüpfen, Erkunden, Ordnen und Vertiefen – aufgreifen.

1. Fragen Die Phase des *Fragens* entspricht dem Kernprozess des *Anknüpfens*. So sollen die Lernenden in dieser Phase ebenfalls ihr Vorwissen aktivieren und Fragen anhand einer in einem Cartoon abgebildeten Alltagssituation formulieren, die als Vorausorientierung dienen. Die Bezeichnung der Phase mit *Fragen* statt *Anknüpfen* wurde bewusst gewählt, um die zentrale Rolle des Fragenstellens in den Vordergrund zu rücken und Lernenden und Lehrenden transparent zu machen.

Abbildung 9.1

Phasierung der Unterrichtskonzeption *ma₆c*



Erarbeitung der Grundvorstellungen (2. - 5.)

Im Sinne der sukzessiven Vernetzung der Grundvorstellungen und Johnstone-Ebenen (DP4) werden die Grundvorstellungen zunächst einzeln erarbeitet und anschließend miteinander vernetzt. Die Würfelvorstellung sollte als erstes erarbeitet werden, da dort die Symbolschreibweise der Dichte eingeführt wird, die bei den anderen Grundvorstellungen vorausgesetzt wird. Ansonsten kann die Reihenfolge der Grundvorstellung beliebig gewählt werden, um Lehrkräften eine möglichst große Flexibilität zu bieten. Es wird jedoch die im Rahmen der Herleitung der Grundvorstellungen begründete Reihenfolge empfohlen (siehe Abschnitt 8.3). Die Erarbeitung der Grundvorstellungen erfolgt anhand der folgenden vier Phasen, die für jede Grundvorstellung einzeln durchlaufen werden.

2. Erkunden Die Phase des *Erkundens* entspricht dem gleichnamigen Kernprozess. So ist diese Phase ebenfalls von Offenheit, Kreativität und kooperativem Austausch geprägt. In Zweiergruppen entwickeln Lernende individuelle Lösungen zu Problemen und Erklärungen zu Phänomenen, entdecken Zusammenhänge oder

stellen Vermutungen auf und überprüfen diese experimentell. Ziel dabei ist es, den Lernenden im Sinne des genetischen Lernens die individuelle und aktive Konstruktion der jeweiligen Grundvorstellung zu ermöglichen.

3. Erschließen Die Phase des *Erschließens* konzentriert sich auf die Reflexion und Systematisierung der individuell erkundeten Erkenntnisse. Dabei steht die aktive Durchdringung und Verknüpfung des explorativ gewonnenen Wissens sowie Aufbau einer gemeinsamen Wissens- und Sprachbasis im Vordergrund.

4. Sichern Die Phase des *Sicherns* fokussiert sich hingegen darauf, das gewonnene Wissen zu dokumentieren und dadurch langfristig verfügbar zu machen. Dies erfolgt unter aktiver Beteiligung der Lernenden.

Die Phasen des Erschließens und des Sicherns decken zusammen den Kernprozess des Ordners ab. Eine solche Zweiteilung des Ordners ist nicht neu. So beschreiben Prediger et al. (2011) eine analoge Zweiteilung, verwenden dort jedoch den Begriff des *Systematisierens* statt des *Erschließens*.

Im Unterrichtskonzept *ma_Gic* wurde der Begriff des Erschließens jedoch bewusst gewählt, da er den Prozess des Öffnens und Verstehens der in der Erkundungsphase gesammelten Erkenntnisse stärker betont als das Systematisieren. Die Entscheidung zur Unterteilung des Ordners in zwei Phasen wurde getroffen, da sich die beiden Phasen in ihren kognitiven Anforderungen an die Lernenden deutlich unterscheiden. Während das Erschließen mit einer Erweiterung des Wissens einhergeht, geht es bei der Sicherung um das Dokumentieren des bereits vorhandenen Wissens.

Zudem wird durch die Zweiteilung der Begriff des Sicherns hervorgehoben, der Lehrkräften bekannt sein dürfte. So wird möglicherweise die Zugänglichkeit des Unterrichtskonzepts für Lehrkräfte erhöht und dessen Integration in bestehende Unterrichtsstrukturen erleichtert.

5. Vertiefen Nach der Sicherung folgt die Phase des *Vertiefens*, die dem gleichnamigen Kernprozess entspricht. Anhand von Übungsaufgaben wenden die Lernenden zuvor Gelerntes an und erweitern es.

6. Vernetzen Nachdem für jede Grundvorstellungen die vier Phasen (Erkunden, Erschließen, Sichern und Vertiefen) durchlaufen wurden, folgt die abschließende Phase des *Vernetzens*. In dieser Phase werden die zuvor nahezu isoliert erarbeiteten Grundvorstellungen miteinander vernetzt. Dazu bearbeiten die Lernenden komplexere Aufgaben, bei denen Grundvorstellungen gezielt genutzt und miteinander kombiniert werden müssen.

9.2.2 Allgemeiner Aufbau

Aufbau der Arbeitsblätter

Kernfragen Kernfragen sind ein zentraler Bestandteil des genetischen Lernens (DP1) und bieten Lernenden eine Vorausrorientierung für den Erarbeitungsprozess. Daher sind sie auf jedem Arbeitsblatt als Überschrift zu finden. Dazu war es zunächst erforderlich, Kernfragen zu formulieren, die für eine genetische Erarbeitung der Grundvorstellungen geeignet sind. Da die Grundvorstellungen, wie bereits erwähnt, einzeln erarbeitet werden, wurde für jede Grundvorstellung eine eigene Kernfrage entwickelt, die in der Vorschauerspektive eine plausible Frage an die Erfahrungswelt der Lernenden darstellt und in der Rückschau mithilfe der jeweiligen Grundvorstellung beantwortet werden kann.

Die formulierten Kernfragen lauten:

- *Würfelvorstellung*: Wie kann man die Masse von Stoffen verhältnismäßig vergleichen?
- *Auftriebsvorstellung*: Wie kann man erklären, ob etwas aufsteigt, schwebt oder sinkt?
- *Teilchenvorstellung*: Wie kann man Dichteunterschiede von Stoffen erklären?
- *Umrechnungsvorstellung*: Wie kann man die Masse in Volumen und Volumen in Masse umrechnen?

Inwiefern die Kernfragen an die Erfahrungswelt der Lernenden anknüpfen, wird insbesondere durch die Anbindung der Fragen an alltägliche Phänomene und Situationen deutlich, die in der Phase des Fragens und des Erkundens näher vorgestellt werden (siehe Abschnitt 9.2.3). Lediglich die Kernfrage zur Teilchenvorstellung

lung stellt erst dann eine plausible Fragestellung an die Erfahrungswelt der Lernenden dar, wenn Dichteunterschiede auf der makroskopischen Ebene im Rahmen der Würfelvorstellung betrachtet wurden. Da die Würfelvorstellung jedoch sowieso als erstes vermittelt werden sollte (siehe Abschnitte 8.3 und 9.2.1), stellt dies kein Problem dar.

Aufgabengestaltung Die einzelnen Aufgaben auf den Lernmaterialien werden durch Aufgabenüberschriften und teilweise auch durch einleitende Sätze begleitet. Diese sollen den Lernenden als Orientierungshilfe dienen und den Nutzen der jeweiligen Aufgabe im Sinne des intelligenten Übens (siehe Abschnitt 3.5) transparent machen. Die Aufgabenstellungen sind zudem sprachlich möglichst einfach und mithilfe von fett hervorgehobenen Operatoren formuliert, um die Erfassung des Handlungsauftrags zu erleichtern.

Farbgestaltung Die Lernmaterialien sind entsprechend der Farbgebung des Projekts chem:LEVEL (Haas, 2021) zur Trennung der Johnstone-Ebenen gestaltet. So sind die Materialien der Würfel- und Auftriebsvorstellung im Blau der makroskopischen Ebene, die der Teilchenvorstellung im Orange der submikroskopischen Ebene und die der Umrechnungsvorstellung im Grün der Symbolebene dargestellt. Dies soll den Lernenden transparent machen, auf welcher Ebene sie sich gerade befinden (DP4). Die Symbole der Ebenen unterstützen dies zusätzlich und ermöglichen zudem eine Identifikation der Ebenen bei schwarz-weiß Kopien der Materialien. Voraussetzung dafür ist eine vorherige Thematisierung des chem:LEVEL-Dreiecks.

Begleitende Website

Die Lernmaterialien werden durch eine Website (Link: <https://nawikonzepte.uni-muenster.de/magic>) begleitet, die die Materialien mithilfe von digitalen Inhalten ergänzt und so zur Umsetzung der Designprinzipien sowie zur Unterstützung der Lernprozesse beitragen soll.

Die Website wurde eigens durch Unterstützung einer studentischen Hilfskraft mit Erfahrungen im Informatikbereich sowie *ChatGPT* entwickelt. Sie basiert auf den beiden Open-Source-Frameworks *mind-AR* (Yuen, 2024) und *A-frame* (Marcos et al., 2024), wodurch zum einen die Umsetzung von Augmented-Reality (AR)-Inhalten

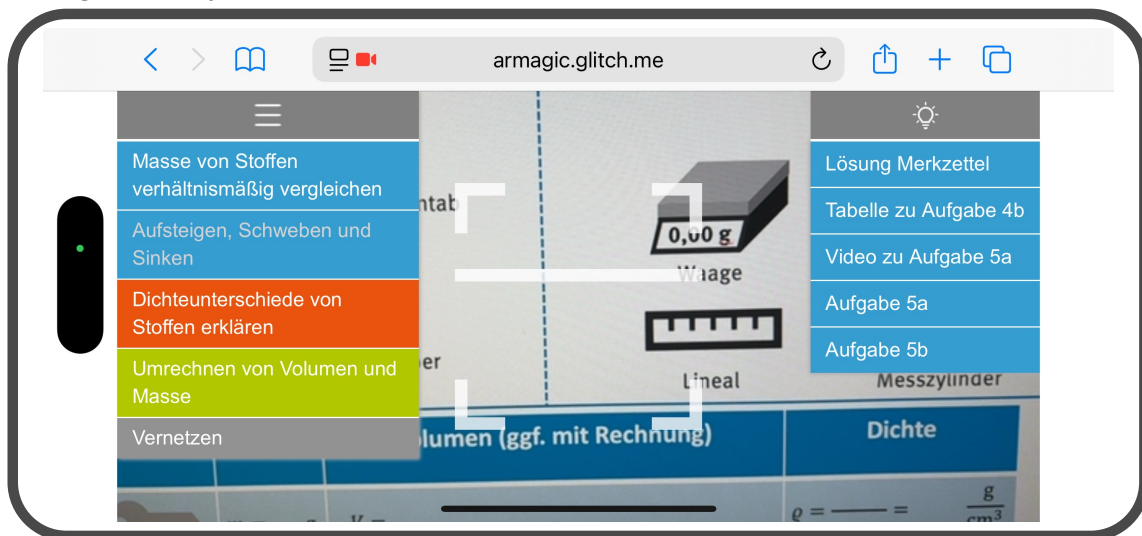
und zum anderen die Image-Tracking-Funktion ermöglicht wird. Letztere erlaubt ähnlich wie bei QR-Codes die Verlinkung digitaler Inhalte, verwendet jedoch Bilder als Marker anstelle von zweidimensionalen Barcodes.

Die Website ist auf allen Endgeräten mit Chrome- oder Safari-Browser sowie einer Kamera erreichbar. Zudem wurde die Website als eine *Progressive Web App* entwickelt, sodass sie neben der Webansicht im Browser auch als App auf dem Home-screen gespeichert und offline verwendet werden kann. Die hohe Unabhängigkeit von Endgeräten sowie die Möglichkeit zur Online- und Offlinenutzung tragen zu einem barrierearmen Zugang der Website bei und ermöglichen einen flexiblen Einsatz im Unterricht.

In Abbildung 9.2 ist der grundlegende Aufbau der Website dargestellt.

Abbildung 9.2

Grundlegender Aufbau der Website



Oben links muss zunächst ausgewählt werden, welche Materialien aktuell bearbeitet werden. Oben rechts können dann zusätzliche Inhalte wie gestufte Lernhilfe, Tabellen und Videos zu den Aufgaben abgerufen werden. In der Mitte wird das Bild der Kamera des entsprechenden Endgeräts zum Scannen von Objekten angezeigt. Im Folgenden werden die einzelnen Inhalte der Website beschrieben.

AR-Inhalte Unter AR wird die Möglichkeit verstanden, „über technische Hilfsmittel wie ein Smartphone oder Tablet Elemente wie Bilder, Texte, Animationen oder 3D-Modelle in realen Umgebungen projiziert anzuzeigen“ (Probst et al., 2021, S. 165).

Im Rahmen der Lernmaterialien wird die AR-Technologie einerseits zur potenziellen Steigerung der Motivation (Probst et al., 2021) und andererseits aufgrund ihres didaktischen Potenzials zur Vernetzung der Johnstone-Ebenen (DP4) eingesetzt. Letzteres wird darauf zurückgeführt, dass sich die Johnstone-Ebenen mithilfe von AR zeitlich und räumlich nah beieinander darstellen (räumliches und zeitliches Kontiguitätsprinzip) und damit Split-Attention-Effekte verringern lassen (Probst et al., 2021; Ripsam & Nerdel, 2022). Gleichzeitig kann aufgrund der medialen Trennung ein problematisches Vermischen der Ebenen (siehe Abschnitt 1.3) vermieden werden. In Abbildung 9.3 ist ein Ausschnitt aus den Lernmaterialien dargestellt, der dies verdeutlicht.

Abbildung 9.3

Ausschnitt aus den Lernmaterialien: AR-basierte Vernetzung der Johnstone-Ebenen unter Vermeidung ihrer Vermischung

① Dichte Stoffe auf der Teilchenebene

a) Unten siehst du vier Stoffpaare. Bei jedem Paar hat der rechte Stoff eine größere Dichte als der linke Stoff. Woran liegt das? **Schaue** dir die Stoffe auf der Teilchenebene an, indem du die Paare scannst. **Schreibe** deine Vermutung auf, warum der rechte Stoff eine höhere Dichte hat.

gasförmiges Wasser
kleinere Dichte

flüssiges Wasser
größere Dichte

Gasförmiges Wasser: Vermutung: _____

flüssiges Wasser: Vermutung: _____

warme Luft
kleinere Dichte

kalte Luft
größere Dichte

Warme Luft: Vermutung: _____

kalte Luft: Vermutung: _____

$m=207\text{ u}$

$m=197\text{ u}$

Neon
kleinere Dichte

Argon
größere Dichte

Neon: Vermutung: _____

Argon: Vermutung: _____

Neben den in der Abbildung dargestellten 3D-Modellen umfassen die in den Lernmaterialien verwendeten AR-Inhalte überwiegend kurze Animationen, die zur Dynamisierung der entsprechenden statischen Bilder der Lernmaterialien dienen.

Simulationen Angesichts ihres in Abschnitt 3.4 dargelegten Potenzials, insbesondere zur Verwirklichung des genetischen Lernens (DP1) und der Darstellungsvernetzung (DP4), werden Simulationen an verschiedenen Stellen der Lernmaterialien zum Erkunden von Zusammenhängen eingesetzt.

Im Folgenden soll ein kurzer Einblick in den grundlegenden Aufbau der Simulationen in den Lernmaterialien gegeben werden. Dies erfolgt exemplarisch anhand der Simulation zur Teilchenvorstellung in der Vertiefungsphase (siehe Abbildung 9.4).

Abbildung 9.4

Grundlegender Aufbau der Simulationen in den Lernmaterialien am Beispiel der Teilchenvorstellung

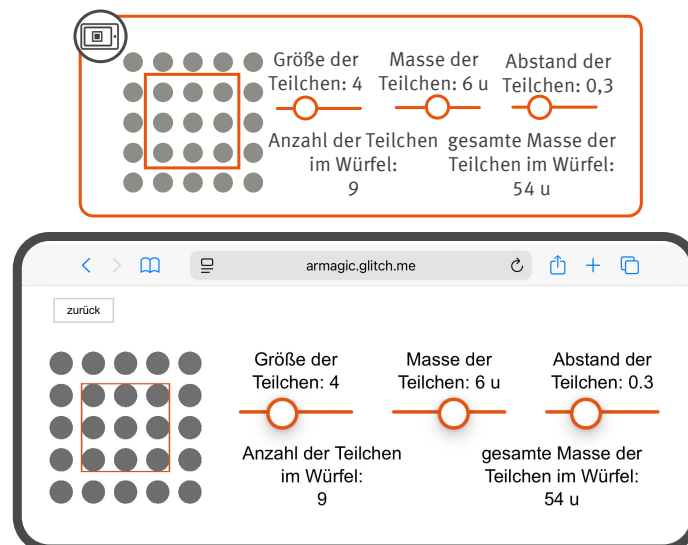
④ Die Dichte auf der Teilchenebene ohne Rechnen vergleichen

Häufig muss man gar nicht rechnen, wenn man die Dichte vergleichen möchte. Wie verändert sich bei den jeweiligen Beispielen die Dichte? **Beschreibe** es, ...

a) ... indem du nicht zutreffende Begriffe durchstreichst. **Überprüfe** deine Lösung mithilfe der Simulation.

Beispiel „Metalle“

Die Teilchen von Wolfram und Barium haben den gleichen Abstand zueinander. Die Teilchen von Wolfram sind aber kleiner und schwerer. Deshalb ist die Dichte von Wolfram **größer | kleiner** als von Barium.



Diese zielt darauf ab, die Auswirkungen von Größe, Masse und Abstand von Teilchen auf die Gesamtteilchenmasse in einem festen Volumen bzw. die Dichte zu verdeutlichen. Die eigentliche Simulation wird durch Lückentexte begleitet. Dies soll einerseits zum Aufstellen von Hypothesen anregen und andererseits durch die gezielte Fokussierung auf einzelne Variablen die möglichen Optionen für die Lernenden reduzieren (siehe *Unterstützung* in Abschnitt 3.4).

Darüber hinaus befindet sich unter den Lückentexten eine grafische Abbildung der Simulation, die einen visuellen Eindruck von der Simulation bieten soll und als Marker für das Aufrufen der Simulation dient. Daraus ergeben sich insbesondere zwei didaktische Potenziale im Vergleich zu QR-Codes: Zum einen stellt die Abbildung der Simulation zu Beginn der Aufgabe zusammen mit den Lückentexten eine räumlich nahe Text-Bild-Kombination (räumliches Kontiguitätsprinzip) im gleichen Medium dar. Dadurch könnte, im Sinne der CTML, der Lernprozess besser unterstützt werden, als durch das Abrufen der Simulation auf einem separaten digitalen Endgerät. Zum anderen könnte die Abbildung rückblickend als statische Erinnerungshilfe für die flüchtigen und dynamischen Inhalte der Simulation dienen.

In der Simulation selbst können verschiedene Eigenschaften per Schieberegler interaktiv verändert werden. Im Sinne des dynamic-linkings (siehe Abschnitt 3.4) wirken sich diese Veränderungen auf die entsprechenden Darstellungen aus. Beispielsweise passen sich bei einer Vergrößerung des Abstandes sowohl die bildliche Darstellung als auch die Werte für den Abstand, die Anzahl der Teilchen sowie die gesamte Masse aller Teilchen im Würfel entsprechend an.

Gestufte Lernhilfen Gestufte Lernhilfen sind eine geeignete Methode zur Unterstützung von Lernenden, bei der Bearbeitung komplexerer Aufgaben, die mehrere Lösungsschritte erfordern (Hänze et al., 2010). Die einzelnen Hilfen umfassen „in sachlogischer Reihenfolge jeweils die wesentlichen Überlegungen oder Handlungen zur Bewältigung eines Teilproblems“ (Hänze et al., 2010, S. 67) und setzen sich aus einem Impuls in Form einer Frage oder Aufforderung sowie einer entsprechenden Rückmeldung zusammen.

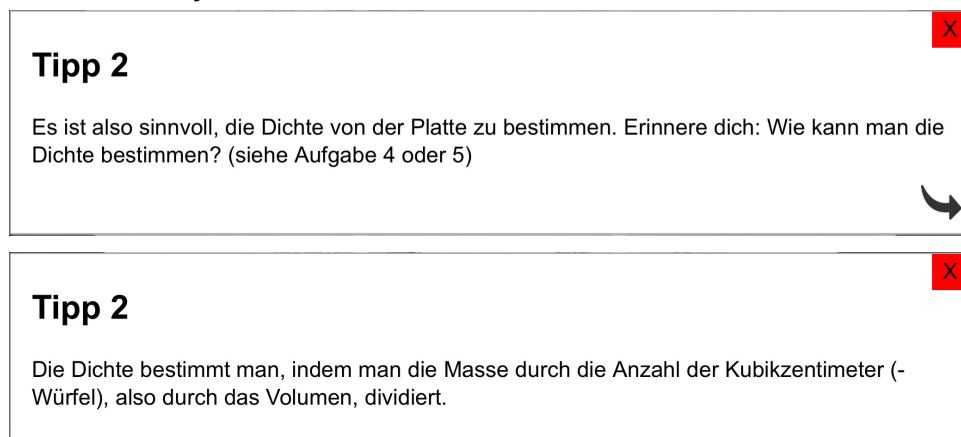
Die konkreten Impulse können dabei unter anderem lernstrategisch (z. B. „Fertige eine Skizze an!“) oder inhaltlich (z. B. „Du benötigst das Faraday-Gesetz!“) sein (Forschergruppe Kassel, 2004) und „von einem allgemein gehaltenen Impuls zu im-

mer detaillierteren Hilfen voranschreiten“ (Marohn, 2013, S. 13). Die letzte Hilfe kann dann die komplette Lösung der Aufgabe beinhalten (Hänze et al., 2010).

Entsprechend dieses Vorgehens wurden konkret gestufte Lernhilfen für komplexere Aufgaben in den Lernmaterialien entwickelt. Diese können auf der Website abgerufen werden. Ein Symbol in Form einer Glühbirne auf dem Arbeitsblatt weist auf die Verfügbarkeit von Hilfen zu der Aufgabe hin. Ein Beispiel für eine Lernhilfe ist in Abbildung 9.5 dargestellt.

Abbildung 9.5

Beispiel für eine Lernhilfe



Anmerkung. Die Lernhilfe setzt sich zusammen aus einem Impuls (obere Abbildung) und einer entsprechenden Rückmeldung (untere Abbildung), die durch ein Tippen auf den Pfeil angezeigt wird.

9.2.3 Konkretisierung der Phasen anhand der Würfel- und Auftriebsvorstellung

In dem vorherigen Abschnitt wurden die Phasierung der Unterrichtskonzeption sowie der allgemeine Aufbau der Lernmaterialien dargelegt. In diesem Abschnitt erfolgt nun die konkrete Ausgestaltung der einzelnen Phasen exemplarisch anhand der Lernmaterialien der Würfel- und Auftriebsvorstellung.

1. Fragen Zur konkreten Umsetzung der Phase des Fragens wurde analog zur *mathewerkstatt* ein Cartoon entwickelt. Dieser sollte:

1. ein Anknüpfen an die Vorerfahrungen der Lernenden ermöglichen (DP3),
2. Probleme andeuten, die bei Lernenden Fragen aufwerfen und eine Annäherung an die Kernfragen ermöglichen (DP1)
3. alle vier Grundvorstellungen ansprechen, um die Zusammengehörigkeit der Grundvorstellungen zur Dichte zu verdeutlichen (DP4).

Der fertige Cartoon, die angesprochenen Grundvorstellungen sowie die zugehörigen Kernfragen sind in Abbildung 9.6 dargestellt.

Abbildung 9.6

Cartoon der Phase des Fragens



Anmerkung. Eine Skizze des Cartoons wurde eigens entwickelt, während die Colorierung und Ausgestaltung von einem Arbeitskollegen, M. Fleige, der über Erfahrung im Grafikdesign verfügt, übernommen wurde.

Der Cartoon zeigt verschiedene problemhaltige Situationen auf einem Jahrmarkt, die jeweils auf eine bestimmte Grundvorstellung und dazugehörige Kernfrage abzielen.

Auftriebsvorstellung Die Situationen mit dem Entenfischen und dem Ballonstand zielen auf die Auftriebsvorstellung ab. Das unterschiedliche Auftriebsverhalten augenscheinlich identischer Objekte (Enten bzw. Luftballons) dient der Problematisierung des Aufsteigens und Sinkens von Objekten in flüssigen und gasförmigen Stoffen. Dies soll einerseits zur Kernfrage „Wie kann man erklären, ob etwas aufsteigt, schwebt oder sinkt?“ heranzuführen und andererseits an die Erfahrungswelt der Lernenden anknüpfen. So dürfte das Sinken von luftbefüllten undichten Objekten sowie das Aufsteigen von Heliumballons den Lernenden bekannt sein. Die dargestellten Phänomene können zunächst mithilfe der Auftriebsvorstellung erklärt werden, jedoch werfen sie gleichzeitig ein weiteres Problem auf: Wieso sinkt ein luftgefüllter Ballon statt zu schweben, obwohl innerhalb und außerhalb des Ballons der gleiche Stoff und somit die gleiche Dichte vorliegt? Dies kann als Anlass zur Behandlung der mittleren Dichte von Objekten verwendet werden.

Würfelvorstellung In der Situation mit dem Stärkewettbewerb wird die auch häufig in Schulbüchern thematisierte Problematik aufgegriffen, dass kleinere Objekte trotz geringeren Volumens sehr schwer sein können, während größere Objekte manchmal unerwartet leicht sind. Diese Problematik dürfte Lernenden ebenfalls aus dem Alltag bekannt sein (z. B. beim Tragen von Koffern oder Paketen) und dient dazu, die Würfelvorstellung anzusprechen und an die Kernfrage „Wie kann man die Masse von Stoffen verhältnismäßig vergleichen?“ heranzuführen.

Teilchenvorstellung Der Sicherheitsmann mit der AR-Brille soll an die Kernfrage „Wie kann man Dichteunterschiede von Stoffen erklären?“ heranzuführen und damit die Teilchenvorstellung ansprechen. Die AR-Brille wurde aus den folgenden zwei Gründen als eine geeignete Möglichkeit für die herausfordernde Integration der submikroskopischen Grundvorstellung in die makroskopische Jahrmarktsituation erachtet:

1. Der Einsatz optischer Hilfsmittel wie Lupen oder Brillen zur Verdeutlichung eines Wechsels von der makroskopischen zur submikroskopischen Ebene könnte Lernenden bereits bekannt sein, da dies teilweise in Schulbüchern eingesetzt wird.
2. Die AR-Technologie wird in dem Material zur Erarbeitung der Teilchenvor-

stellung ebenfalls verwendet, um die makroskopische und die submikroskopische Ebene miteinander zu vernetzen und hat damit einen Wiedererkennungswert für den späteren Lernprozess.

Umrechnungsvorstellung Die Situation am Süßigkeitenstand greift die gleiche Problematik wie bei dem Stärkewettbewerb auf. Durch die zugehörigen Sprechblasen und die Angabe konkreter Werte, soll jedoch an die Kernfrage „Wie kann man die Masse in Volumen und Volumen in Masse umrechnen?“ und damit an die Umrechnungsvorstellung herangeführt werden. Der Lebensmittelkontext wurde bewusst gewählt, da der gleiche Kontext für die Erarbeitung der Umrechnungsvorstellung verwendet wird und damit einen Wiedererkennungswert besitzt.

Als eine zusätzliche Situation wurde der Mann über der Badewanne hinzugefügt. Diese bietet Lehrkräften die Möglichkeit, die Geschichte zur Entdeckung der Dichte durch Archimedes zu thematisieren.

Im Unterricht sollen Lernende durch den Cartoon aufgefordert werden, Fragen zu den Situationen mit den Sprechblasen zu formulieren. Die Fragen werden anschließend digital (beispielsweise mit „Flinga“, n. d.) oder analog gesammelt und festgehalten, um in der Phase des Sicherns auf sie zurückgreifen zu können. Die Lehrkraft kann dann den Fokus auf die Fragen zu einer bestimmten Situation lenken, um anschließend mit der Erarbeitung der entsprechenden Grundvorstellung zu beginnen.

Würfelvorstellung

2. Erkunden In der Phase „Erkunden“ der Würfelvorstellung entwickeln die Lernenden zur Kernfrage „Wie kann man die Masse von Stoffen verhältnismäßig vergleichen?“ eigenständig die Lösungsidee „Man muss gleiche Volumina von Stoffen vergleichen“, die im Wesentlichen der Würfelvorstellung entspricht.

Aufgabe 1a Die Lösungsidee entwickeln die Lernenden zu Beginn enaktiv anhand eines Süßigkeitenexperiments (Aufgabe 1a). In diesem sollen die Lernenden herausfinden, welche von den drei Süßigkeiten Marshmallow, Lakritzbonbon und Speckmaus aus dem „schwersten“ Stoff besteht. Dazu müssen die Lernenden die Süßigkeiten mithilfe einer Schere auf das gleiche Volumen bringen und wiegen. Dabei

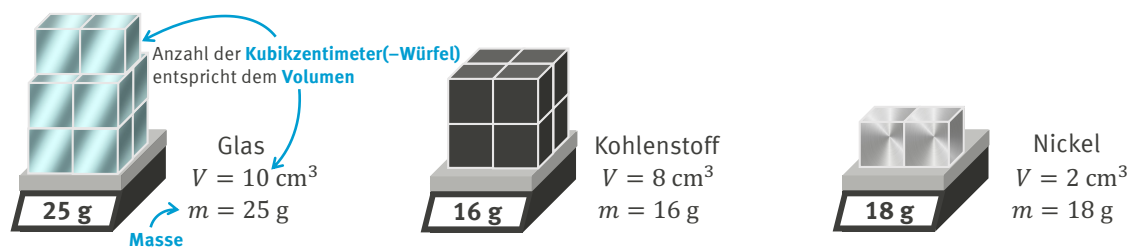
sind verschiedene Strategien denkbar: So können die Lernenden zwei der Süßigkeiten auf das Volumen der dritten Süßigkeit bringen oder aus allen Süßigkeiten ein gleich großes Volumen herausschneiden. Es wurden bewusst Süßigkeiten mit großen Dichteunterschieden ausgewählt, sodass auch bei ungenauem Schneiden die korrekte Lösung gefunden werden kann.

Aufgabe 1b Im nächsten Schritt (Aufgabe 1b) entwickeln die Lernenden die Lösungsidee auf der bildlichen Darstellungsebene anhand von Würfeldarstellungen (siehe Abbildung 9.7).

Abbildung 9.7

Ausschnitt aus der Aufgabe 1b der Würfelvorstellung

- b) Unten siehst du Objekte aus verschiedenen Stoffen. Welcher ist der „schwerste“ Stoff? **Begründe.**
Hinweis: Deine Erkenntnisse aus Aufgabe a) können dir helfen.



Hierzu müssen die Lernenden erneut bestimmen, welches der dargestellten Objekte aus dem schwersten Stoff besteht, indem sie die Objekte auf das gleiche Volumen bringen und die Massen vergleichen. Dabei können sie ähnliche Strategien zur vorherigen Aufgabe verwenden. So kann das Volumen von zwei Objekten auf das Volumen des dritten Objekts angepasst werden oder jeweils die Masse von einem Kubikzentimeterwürfel bestimmt werden.

Bei der zweiten Strategie entwickeln die Lernenden bereits implizit die Formel zur Berechnung der Dichte. Es ist jedoch auch möglich, sich an die Lösung ohne Berechnung durch qualitatives Vergleichen zu nähern. Beispielsweise wiegt das Objekt aus Kohlenstoff im Vergleich zu dem aus Glas bei annähernd gleichem Volumen deutlich weniger, sodass Kohlenstoff als Lösung ausgeschlossen werden kann.

Zudem sind die Lernenden frei in der Formulierung ihrer Strategien. Sie können diese beispielsweise verbal unter Zuhilfenahme der Würfel oder mithilfe des abstrakteren Begriffs des Volumens beschreiben. Alternativ ist auch eine Darstellung mit Symbolen in Form einer Rechnung möglich.

Bezug zu Designprinzipien Insgesamt verwirklichen die beiden Aufgaben zwei Designprinzipien. Zum einen wird das genetische Prinzip (DP1) verwirklicht, indem die Lernenden eine Lösungsidee zur Kernfrage entwickeln, die im Kern der Würfelvorstellung entspricht. Die verschiedenen Strategien und Formulierungsmöglichkeiten bieten dabei ein gewisses Maß an Selbstdifferenzierung und ermöglichen es den Lernenden sich der Lösungsidee individuell zu nähern.

Zum anderen wird das Prinzip der Darstellungsverwendung und -vernetzung verwirklicht (DP2). So entwickeln die Lernenden die Lösungsidee auf verschiedenen Darstellungsebenen, zunächst auf der gegenständlichen und anschließend auf der bildlichen Ebene. Der Wechsel dieser Ebenen soll durch den Hinweis in Aufgabe 1b unterstützt werden. Auch Darstellungen auf der Symbolebene, wie die Größensymbole für Volumen und Masse, werden verwendet und die Vernetzung zur makroskopischen Ebene durch die Pfeile in Aufgabe 1b unterstützt.

3. Erschließen In der Erschließungsphase werden die Erkenntnisse aus der vorherigen Phase reflektiert und mit dem Dichtebegriff verknüpft.

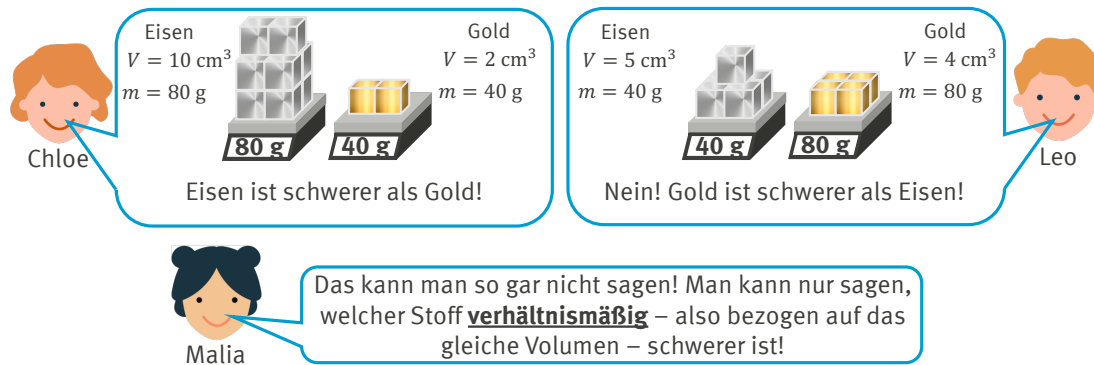
Ausschnitt aus der Aufgabe 2 (Reflexionsaufgabe) Die Reflexion wird durch eine Aufgabe (siehe Abbildung 9.8) angeregt, welche die Problematik des Massenvergleichs von Stoffen durch die Aussagen fiktiver Lernender hervorhebt.

Dabei wird zur einfacheren Kommunikation die Bezeichnung *verhältnismäßig* als Kurzform für *bezogen auf das gleiche Volumen* eingeführt, die im späteren Lernprozess durch den Dichtebegriff ersetzt wird. Die beiden Impulsfragen sollen die Reflexion sowohl der erkundeten Lösungsidee als auch der verschiedenen Lösungsstrategien anregen. Durch die Bearbeitung der Aufgabe innerhalb einer Murmelphase und die anschließende Besprechung im Plenum soll sichergestellt werden, dass sich möglichst alle Lernende mit der Aufgabe beschäftigen und alternative Strategien ihrer Mitschülerinnen und Mitschüler kennenlernen.

Abbildung 9.8

Aufgabe 2 der Würfelvorstellung (Reflexionsaufgabe)

Was genau meint Malia? **Tausche** dich mit deiner Partnerin/deinem Partner aus. Welcher Stoff ist verhältnismäßig am schwersten? **Begründe**.



Aufgabe 3a Im Anschluss daran wird das Erkundete anhand eines Erklärvideos mit dem Dichtebegriff in Verbindung gebracht. Das Erklärvideo wurde mithilfe von Powerpoint und unter Berücksichtigung der Gestaltungsprinzipien auf Basis der CTML (siehe Abschnitt 3.3.3) entwickelt. So wurde beispielsweise (a) auf eine zeitgleiche Präsentation der bildlichen Darstellungen mit dem Gesprochenen geachtet (zeitliche Kontiguität), (b) die Darstellung von Informationen auf das Notwendigste reduziert (Kohärenz) sowie (c) Pausen zwischen Sinnabschnitten integriert (Segmentierung). In dem Video werden

- die Problematik des Massenvergleichs von Stoffen verbalisiert,
- die Dichte als eine Stoffeigenschaft zum verhältnismäßigen Massenvergleich von Stoffen eingeführt,
- die Beschreibung der Dichte als Masse eines Kubikzentimeterwürfels (Würfelvorstellung) eingeführt,
- die schrittweise Übersetzung von der Masse eines Kubikzentimeterwürfels bis zur Darstellung einer Dichteangabe in der Symbolschreibweise veranschaulicht,
- die fachsprachliche Formulierung „der Stoff hat eine größere Dichte“ in Abgrenzung zur umgangssprachlichen Formulierung „der Stoff ist schwerer“ eingeführt.

Die Lernenden halten dabei die zentralen Informationen des Erklärvideos mithilfe einer begleitenden Aufgabe (Aufgabe 3a) fest (siehe Abbildung 9.9).

Abbildung 9.9

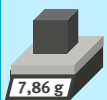
Aufgabe 3a der Würfelvorstellung

In der Chemie nutzt man die Stoffeigenschaft *Dichte*, um die Masse von Stoffen verhältnismäßig zu vergleichen.

a) Erfahre mehr über die Dichte!

Schaue dir das Video zu der Aufgabe an.

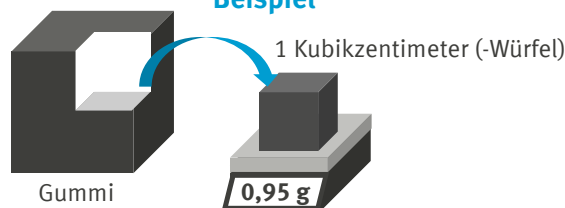
Schreibe wichtige Informationen aus dem Video auf, indem du die Lücken vervollständigst.



Die Dichte ist eine _____.

Sie gibt an, wie viel ein _____ eines Stoffes wiegt.

Beispiel



Wir beobachten:

Ein Kubikzentimeter(-Würfel) Gummi _____ 0,95 Gramm.

Wir sagen:

Die Dichte von Gummi beträgt 0,95 _____ pro _____.

Wir schreiben:

ρ ist der griechische Buchstabe „Rho“ von Gummi

$$\rho(\text{Gummi}) = 0,95 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

pro

Die Darstellungen und Sätze in der Aufgabe entsprechen dabei denen im Erklärvideo, um das Eintragen der Informationen zu erleichtern.

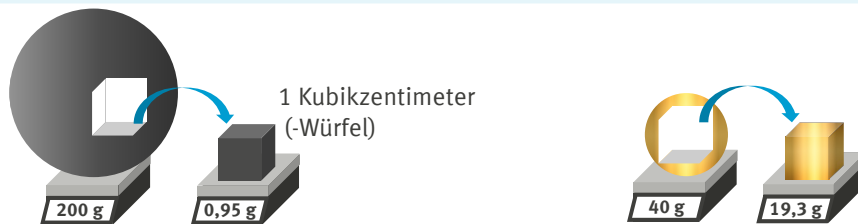
In der Aufgabe werden zum einen die Würfelvorstellung verbalisiert und damit expliziert (DP5) und zum anderen schrittweise Darstellungsebenen von der bildlichen über die sprachliche bis hin zur symbolischen Ebene übersetzt (DP2). Dies entspricht gleichzeitig einer schrittweisen Übersetzung von der makroskopischen Ebene zur symbolischen Ebene, der durch den Farbwechsel von dem Blau der makroskopischen zu dem Grün der symbolischen Ebene hervorgehoben wird (DP4).

Aufgabe 3b In der anschließenden Aufgabe 3b (siehe Abbildung 9.10) wird der im Video angesprochene Unterschied zwischen *schwer* und *dicht* aufgegriffen, den die Lernenden aktiv nachvollziehen sollen.

Abbildung 9.10

Aufgabe 3b der Würfelvorstellung

- b) Warum ist *schwer* nicht gleich *dicht*? **Schaue** dir unten das Beispiel an und **tausche** dich mit deiner Partnerin/ deinem Partner darüber aus. **Vervollständige** anschließend die beiden Sätze.



Die Gummikugel ist _____ als die Goldkugel, weil sie viel mehr Volumen hat.

Trotzdem ist Gold **dichter** als Gummi, weil _____

Aufgabe 4 Zuletzt wird mithilfe von Aufgabe 4 (siehe Abbildung 9.11) die – je nach verwendeter Strategie in der Erkundungsphase – bereits implizit entdeckte Formel zur Berechnung der Dichte schrittweise erschlossen.

Dies erfolgt zunächst vorstellungsorientiert auf konkreteren Darstellungsebenen und wird dann schrittweise in abstraktere Darstellungsebenen übersetzt.

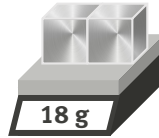
So werden zunächst die Größenangaben auf der Symbolebene unter Zuhilfenahme der Würfeldarstellung auf die sprachliche Ebene übersetzt. Anschließend findet eine vorstellungsorientierte Berechnung der Masse eines Kubikzentimeterwürfels mithilfe der Verteilvorstellung der Division statt, dessen Ergebnis dann mithilfe der Würfelvorstellung als Dichte übersetzt wird. Zuletzt erfolgt eine Übersetzung der Rechnung in die Symbolschreibweise auf dessen Basis dann die Formel der Dichte formuliert wird.

Bezug zu Designprinzipien Insgesamt werden in den Aufgaben der Erschließen-Phase verschiedene Designprinzipien deutlich. So werden konsequent ikonische

Abbildung 9.11

Aufgabe 4 der Würfelvorstellung

Hilf Jerome und bestimme die Dichte von Nickel. **Vervollständige** dazu den Lückentext und **kreuze** an.



$$V = 2 \text{ cm}^3$$

$$m = 18 \text{ g}$$

Ich muss also herausfinden, wie viel ein Kubikzentimeter (-Würfel) Nickel wiegt.

$V = 2 \text{ cm}^3$ und $m = 18 \text{ g}$ bedeuten, dass _____ Kubikzentimeter (-Würfel) 18 g _____.

Wenn man die 18 g gleichmäßig auf die 2 Kubikzentimeter (-Würfel) verteilt, bekommt jeder Würfel _____ g ab.

Die Dichte von Nickel beträgt somit _____ $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$.

Dafür musste ich ☐ $18 \text{ g} - 2 \text{ cm}^3$ ☐ $18 \text{ g} : 2 \text{ cm}^3$ ☐ $2 \text{ cm}^3 : 18 \text{ g}$ rechnen.

Die Formel für die Dichte lautet deshalb auch:

☐ $\rho = m - V$ ☐ $\rho = \frac{m}{V}$ ☐ $\rho = \frac{V}{m}$

Würfeldarstellungen verwendet und ausgehend von diesen schrittweise Übersetzungen zu abstrakteren Darstellungsebenen vorgenommen (DP2). Teilweise entsprechen die Übersetzungen gleichzeitig einer Übersetzung von der makroskopischen zur symbolischen Ebene (DP4). Zudem wird in dem Erklärvideo und der begleitenden Aufgabe die Würfelvorstellung verbalisiert und damit expliziert (DP5). In Aufgabe 4 wird darüber hinaus die Verteilvorstellung der Division aufgegriffen, die Lernenden bereits seit der Primarstufe vertraut sein dürfte (DP3).

4. Sichern In der Sicherungsphase werden zunächst die zentralen Erkenntnisse aus der vorherigen Phase unter aktiver Beteiligung der Lernenden festgehalten.

Merkzettel Dies erfolgt anhand eines Merktzettels (siehe Abbildung 9.12).

Besonderes Gewicht erhält dabei die Grundvorstellung, die als zentrales Ergebnis explizit hervorgehoben und von den weiteren Inhalten abgegrenzt wird, indem sie als Antwort auf die Kernfrage präsentiert (DP1) sowie benannt und verbalisiert (DP5) wird.

Anschließend erfolgt die Berechnung der Dichte sowie die Übersetzung zwischen der symbolischen Schreibweise der Dichte und ihrer Interpretation. Die Aufgaben

Abbildung 9.12

Merkzettel der Würfelvorstellung

Merkzettel

Wie kann man die Masse von Stoffen verhältnismäßig vergleichen?

Antwort: Mithilfe der **Würfelvorstellung** der Dichte!



7,86 g

Würfelvorstellung

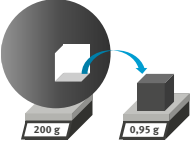
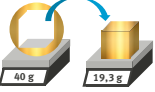
Die Dichte ist eine Stoffeigenschaft. Sie gibt an, wie viel ein Kubikzentimeter(-Würfel) eines Stoffes wiegt.

Bestimmung und Formel der Dichte!

Um die Dichte zu bestimmen, muss man die _____ eines Stoffes durch die Anzahl der _____ (-Würfel) teilen. Deshalb gilt:

$$\text{Dichte} = \frac{\text{Masse}}{\text{Volumen}} \quad \leftrightarrow \quad \rho = \frac{m}{V}$$

Schwer ist nicht gleich dicht!

So schreibt und liest man die Dichte!

Wir schreiben: ρ ist der griechische Buchstabe „Rho“

$\rho(\text{Wasser}) = 1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$

pro _____ (-Würfel)

↕

Wir sagen: Die Dichte von Wasser beträgt 1 _____ pro _____ (-Würfel).

↕

Wir beobachten: Ein Kubikzentimeter(-Würfel) Wasser wiegt _____ Gramm.



v1.4

weisen eine starke Ähnlichkeit zu den Aufgaben der vorherigen Phase auf, sind jedoch nicht mit diesen identisch. Ein Beispiel für eine solche Abweichung ist die Richtung der Übersetzung. Der Grund dafür ist, dass einerseits nicht neue Inhalte erarbeitet, sondern bekannte Inhalte gesichert werden sollen und andererseits ein bloßes Abschreiben vorheriger Aufgaben vermieden werden soll. Zusätzlich beinhaltet der Merkzettel eine Erinnerung an die Unterscheidung zwischen *schwer* und *dicht*.

Der Merkzettel wird im Plenum besprochen, um sicherzustellen, dass alle Lernenden die korrekten Lösungen sichern. Anschließend kann der Merkzettel abgeheftet oder in ein Heft eingeklebt werden, um zu einem späteren Zeitpunkt auf das Wissen zurückgreifen zu können.

Jahrmarktbild-Besprechung Zuletzt werden den Lernenden das Jahrmarktbild und die formulierten Fragen präsentiert, die nun mithilfe der Würfelvorstellung

beantwortet werden sollen. Die Lehrkraft kann dazu die Lernenden explizit auffordern, die Würfelvorstellung zu verwenden (DP5), und zur Unterstützung kleine Quadrate als Modell für die Würfel in die Objekte der Teilnehmenden des Stärke-Wettbewerbs zeichnen (DP2).

Nach der Beantwortung der Fragen kann der Fokus auf eine andere Situation auf dem Jahrmarkt gelenkt und damit die Erarbeitung einer weiteren Grundvorstellung initiiert werden. Alternativ kann mit dem Vertiefen der Würfelvorstellung begonnen werden.

5. Vertiefen In der Vertiefungsphase wenden die Lernenden die zuvor erlernten Inhalte an und erweitern diese.

Hinsichtlich der inhaltlichen Auswahl wurde sich an den Facetten bzw. den Subkategorien der Klasse der Würfelvorstellung orientiert, die im Rahmen der Herleitung der Grundvorstellungen identifiziert wurden (siehe Abschnitt 8.2). Dazu wurde zu jedem Subcode eine Vertiefungsaufgaben entwickelt. So kann sichergestellt werden, dass alle inhaltlichen Facetten der Grundvorstellung abgedeckt sind.

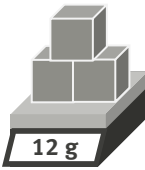
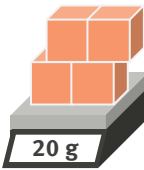
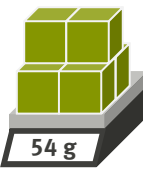
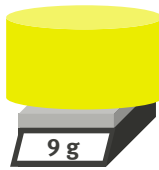
Die Aufgaben wurden zudem so konzipiert, dass sie möglichst die Kriterien des *intelligenten Übens* (Leuders, 2009) (siehe Abschnitt 3.5) erfüllen. So werden die Aufgaben durch Überschriften und teilweise auch einleitende Sätze und Informationen begleitet, die den Lernenden den Nutzen der jeweiligen Aufgabe transparent machen sollen (Sinnstiftung). Zudem liegt der Fokus der Aufgaben überwiegend auf dem eigenständigen Entdecken von Zusammenhängen, anstatt dass diese vorgegeben oder Automatismen eingeübt werden (Entdeckungsoffenheit). Weiterhin bieten gestufte Lernhilfen bei komplexeren Aufgaben auch schwächeren Lernenden einen Zugang zu den Aufgaben (Selstdifferenzierung). Lediglich das Anregen der Lernenden zum Nachdenken über den Lerngegenstand oder die Aufgaben (Reflexivität) wurde aufgrund der begrenzten Unterrichtszeit und der ohnehin schon umfangreichen und herausfordernden Aufgabenanzahl bewusst nicht direkt in die Aufgaben integriert. Dies kann jedoch von der Lehrkraft kompensiert werden, indem sie Reflexionsanlässe bei der Besprechung der Aufgaben initiiert.

Aufgabe 5 In der Aufgabe 5 geht es um die Dichtebestimmung. Die erste Teilaufgabe (5a) dient dabei der Vertiefung der Berechnung der Dichte (siehe Abbildung 9.13).

Abbildung 9.13

Aufgabe 5a der Würfelvorstellung

a) Bestimme die Dichte der einzelnen Stoffe.

 $V = 3 \text{ cm}^3$ $m = 12 \text{ g}$	 $m = 20 \text{ g}$ $V = 4 \text{ cm}^3$	 $m = 54 \text{ g}$ $V = 6 \text{ cm}^3$	 10 cm^3 Öl wiegen 9 g
12 g werden gleichmäßig auf 3 Kubikzentimeter (-Würfel) verteilt.	___ werden gleichmäßig auf ___ Kubikzentimeter (-Würfel) verteilt.	___ werden gleichmäßig auf ___ Kubikzentimeter (-Würfel) verteilt.	___ werden gleichmäßig auf ___ Kubikzentimeter (-Würfel) verteilt.
$\varrho = \frac{12 \text{ g}}{3 \text{ cm}^3}$	$\varrho = \frac{\quad}{\quad}$	$\varrho = \frac{\quad}{\quad}$	$\varrho = \frac{\quad}{\quad}$
$= \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$	$= \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$	$= \frac{\quad}{\quad}$	$= \frac{\quad}{\quad}$

Dabei wurde auf eine konsequente Rückbindung an die Würfelvorstellung und die Verteilvorstellung der Division geachtet, damit der Bezug zur inhaltlichen Denkweise bei der kalkülorientierten Berechnung der Dichte nicht verloren geht (vgl. „inhaltliches Denken vor Kalkül“ nach Prediger, 2009). Dazu vollziehen die Lernenden hier in verkürzter Form die in Aufgabe 4 eingeführte schrittweise Übersetzung von der ikonischen bis zur symbolischen Ebene (DP2) bzw. von der makroskopischen zur symbolischen Ebene (DP4).

In der zweiten Teilaufgabe (5b) geht es um die experimentelle Bestimmung der Dichte, die auch häufig in Schulbüchern zu finden ist. Mithilfe einer Simulation bestimmen die Lernenden zunächst die Masse und das Volumen von Alltagsgegenständen, um anschließend deren Dichte berechnen zu können. Die Volumenbestimmung erfolgt entweder rechnerisch durch das Messen von Kantenlängen geometrischer Objekte oder mithilfe der Wasserverdrängung.

Die Lernenden können die Gegenstände frei mit den Messgeräten kombinieren. So können die Lernenden beispielsweise durch Kombination des Schlüssels mit dem

Messzylinder einen Anstieg des Wasservolumens beobachten und so das Prinzip der Wasserverdrängung zur Volumenbestimmung entdecken. Die Gegenstände wurden bewusst so gewählt, dass jeweils nur eine Art der Volumenbestimmung sinnvoll ist, damit die Lernenden beide Arten kennenlernen. Die Simulation gibt entsprechendes Feedback, wenn die falsche Art der Volumenbestimmung gewählt wird.

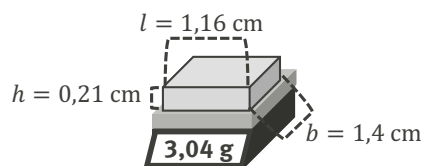
Aufgabe 6 In der Aufgabe 6 sollen die Lernenden unter zur Hilfenahme der Würfelvorstellung erkennen und begründen, dass die Dichte eine Stoffeigenschaft ist. Dies erfolgt anhand von zwei Teilaufgaben (siehe Abbildung 9.14).

Abbildung 9.14

Ausschnitt aus der Aufgabe 6 der Würfelvorstellung

-  **a)** Die Dichte ist auch eine Stoffeigenschaft und somit charakteristisch für einen Stoff. Damit kann man Stoffe leicht bestimmen. **Bestimme** aus welchem Metall die Platte besteht.

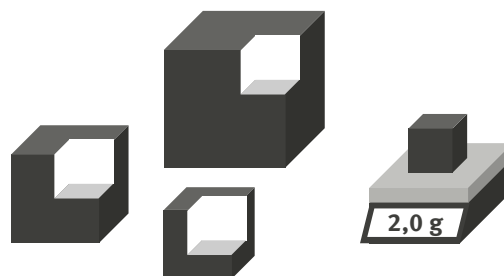
Tipp?



Metall	Dichte in $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
Aluminium	2,7
Nickel	8,9
Blei	11,34
Eisen	7,9

-  **b)** Die Dichte gehört zu den Stoffeigenschaften, die unabhängig vom Volumen eines Stoffes sind. **Begründe** anhand der Abbildung, warum das so ist.

Tipp?



Die erste Teilaufgabe (6a) fokussiert sich darauf, dass die Dichte eine charakteristische Stoffeigenschaft ist, mit deren Hilfe sich somit Stoffe identifizieren lassen. Dazu müssen die Lernenden überprüfen, indem sie die Dichte von einer quaderfö-

migen Metallplatte berechnen und mit den Dichtewerten in der Tabelle vergleichen. Damit bestimmen sie das Metall der Platte.

Die zweite Teilaufgabe (6b) hingegen zielt auf die Unabhängigkeit der Dichte vom Volumen eines Stoffes ab. Die Lernenden sollen anhand der ikonischen Darstellung begründen, dass sich beim Herausschneiden eines Kubikzentimeterwürfels die Masse und damit die Dichte des Stoffes nicht verändern.

Aufgabe 7 Die Aufgabe 7 behandelt die proportionalen und antiproportionalen Zusammenhänge zwischen Dichte und Masse bzw. Dichte und Volumen – sowohl statisch als auch dynamisch. Die erste Teilaufgabe (7a) fokussiert die dynamische Variante, indem die Lernenden beispielsweise erklären müssen, inwiefern sich die Dichte bei einer Vergrößerung der Masse ändert und dies anschließend mithilfe einer Simulation überprüfen (siehe Abbildung 9.15).

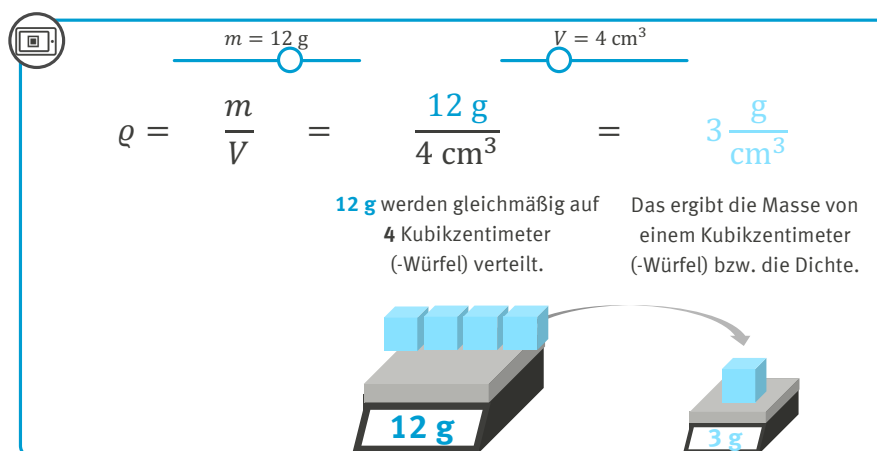
Abbildung 9.15

Ausschnitt aus der Aufgabe 7a der Würfelvorstellung

- a) Welche Zusammenhänge gibt es zwischen Masse, Dichte und Volumen? **Erkläre** es, indem du die Texte korrigierst. **Streiche** dazu nicht zutreffende Begriffe durch. **Überprüfe** die Texte mithilfe der Simulation.

Zusammenhang zwischen Dichte und Masse

Vergrößert man nur die Masse, muss mehr Masse auf mehr | weniger | gleich viele Kubikzentimeter (-Würfel) verteilt werden. Deshalb bekommt jeder Kubikzentimeter (-Würfel) mehr | weniger | gleich viel Masse ab. Die Dichte nimmt zu | nimmt ab | bleibt gleich.



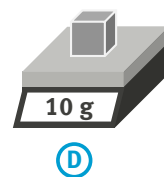
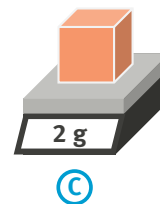
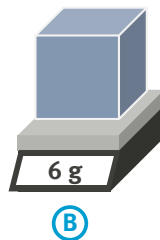
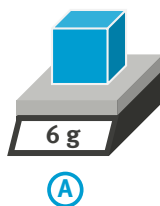
Die Erklärung und die Simulation greifen dabei die Denk- und Übersetzungsschritten auf Basis der Würfelvorstellung und der Verteilvorstellung der Division aus den Aufgaben 4 und 5a auf (DP2 und DP4) auf. Allerdings wurde die Übersetzungsrichtung zwischen der symbolischen und makroskopischen Ebene geändert, um auch die Übersetzung von der symbolischen zur makroskopischen Ebene zu trainieren.

In der zweiten Teilaufgabe (7b) sollen die Lernenden ihre Erkenntnisse aus 7a in der statischen Variante anwenden, in der die Dichte eines Würfels mit der Dichte von anderen Objekten verglichen werden soll (siehe Abbildung 9.16).

Abbildung 9.16

Aufgabe 7b der Würfelvorstellung

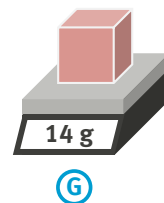
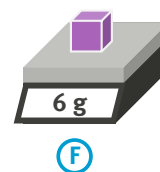
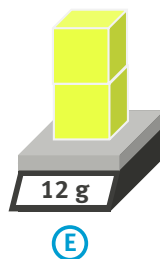
- b) Bei welchen Objekten **B** bis **G** ist die Dichte **größer** als, **kleiner** als oder **genauso groß** wie bei **A**?
Trage die entsprechenden Buchstaben in die Lücken ein.
Hinweis: Die Erkenntnisse aus a) und die Simulation können dir helfen.



Die Dichte von _____ ist **größer**
als die Dichte von A.

Die Dichte von _____ ist **kleiner**
als die Dichte von A.

Die Dichte von _____ ist **genauso groß**
wie die Dichte von A.



Die Objekte wurden dabei nicht als Zusammensetzung aus mehreren Kubikzentimeterwürfeln dargestellt, um einen Dichtevergleich durch das Berechnen der Dichte auszuschließen.

Bezug zu Designprinzipien Insgesamt verwirklichen auch die Aufgaben der Vertiefungsphase einige der formulierten Designprinzipien. Dazu zählen die Verwendung

und Vernetzung von Darstellungen (DP2) sowie die Vernetzung von der makroskopischen und symbolischen Ebene (DP4). Zudem wurden die Aufgaben nach den Kriterien des intelligenten Übens (siehe Abschnitt 3.5) so gestaltet, dass sie ein Entdecken von Zusammenhängen ermöglichen. Dies umfasst beispielsweise die Volumenbestimmung über die Wasserverdrängung oder die proportionalen und antiproportionalen Beziehungen zwischen Dichte, Masse und Volumen. Da das Entdecken ein wesentlicher Bestandteil des genetischen Lernens ist, kann dies zumindest als teilweise Verwirklichung des entsprechenden Designprinzips (DP1) gesehen werden.

Auftriebsvorstellung

2. Erkunden In der Erkundungsphase der Auftriebsvorstellung geht es – anders als bei der Würfelvorstellung – zunächst nicht um die genetische Erarbeitung der Grundvorstellung, sondern um das Anknüpfen und Widerlegen alternativer Vorstellungen (DP3). Grund dafür ist die Vielzahl an alternativen Vorstellungen, die im Bereich des Schwimmens und Sinkens berichtet werden (siehe Abschnitt 8.2) und mit der Auftriebsvorstellung der Dichte konkurrieren. Da im Rahmen der Lernmaterialien nicht auf alle dieser Vorstellungen eingegangen werden kann, wurde sich auf die beiden prominentesten fokussiert, die entweder nur das Volumen oder nur die Masse für das Schwimmverhalten verantwortlich sehen.

Anhand eines Schokoriegelexperiments mit Bounty und Milky Way sollen die Lernenden schrittweise die beiden Vorstellungen widerlegen. Die grundlegende Idee, Schokoriegel im Zusammenhang mit der Dichte zu verwenden, stammt von Witteck et al. (2005) und wurde in der vorliegenden Arbeit zur Widerlegung alternativer Vorstellungen weiterentwickelt. Das Experiment ist in zwei Teilaufgaben unterteilt.

Aufgabe 1a In der ersten Teilaufgabe (1a) sollen die Lernenden analog zu anderen Ansätzen der Vorstellungsentwicklung (siehe *choice²learn* (Marohn, 2008) und *vorstellungsorientierter Unterricht* (Lengnink et al., 2011) in Abschnitt 3.5) die zwei zu widerlegenden Vorstellungen aktivieren und festhalten, damit sie ihnen bewusst werden.

Dazu erfahren die Lernenden zunächst in einer kurzen Geschichte, dass die fiktiven Personen Chloe und Jerome das Schwimmen einer und das Sinken der anderen Sorte Schokoriegel beobachtet haben. Anschließend (a) vergleichen die Lernenden

die Masse und das optisch wahrnehmbare Volumen der Schokoriegel, (b) stellen eine begründete Vermutung über das Schwimmverhalten der Schokoriegel auf, (c) überprüfen ihre Vermutung und (d) notieren die Beobachtung, dass der kleinere und leichtere Milky Way-Riegel schwimmt bzw. der größere und schwerere Bounty-Riegel sinkt.

Aufgabe 1b In der zweiten Teilaufgabe (1b) sollen die beiden Vorstellungen zu einem Widerspruch geführt und damit ein kognitiver Konflikt ausgelöst werden, um eine Vorstellungsentwicklung zu initiieren.

Dazu schneiden die Lernenden ein Stück von dem Bounty-Riegel ab, das kleiner und leichter im Vergleich zum Milky Way-Riegel ist (siehe Abbildung 9.17).

Abbildung 9.17

Ausschnitt aus der Aufgabe 1b der Auftriebsvorstellung

- b) Kann man den Bounty-Riegel schwimmen lassen? **Schneide** ein kleines Stück von dem Bounty-Riegel ab **i)**. **Stelle** eine begründete Vermutung auf, ob das kleine Stück-Bounty schwimmt oder nicht **ii)**. **Überprüfe** deine Vermutung **iii)**.

i) Schneide den Bounty-Riegel kleiner und leichter:


→


Schneide ein kleines Stück Bounty mit der Schere ab.



Überprüfe mithilfe der Waage, ob das kleinere Stück Bounty leichter ist als der MilkyWay-Riegel.
Falls nicht, schneide das Stück Bounty kleiner und überprüfe erneut.

ii) Stelle eine Vermutung auf:



Das kleinere und leichtere Stück Bounty wird
schwimmen | nicht schwimmen, weil _____

Streiche das nicht Zutreffende durch!

Erneut sollen die Lernenden eine begründete Vermutung aufstellen, ob das nun kleinere und leichtere Stück Bounty schwimmt oder immer noch sinkt, und diese anschließend überprüfen. Das Stück Bounty sinkt weiterhin zu Boden, obwohl es kleiner und leichter als der Milky Way-Riegel ist, womit die Beobachtung im gewünschten Widerspruch zur Beobachtung der vorherigen Aufgabe steht.

3. Erschließen In der Erschließungsphase der Auftriebsvorstellung werden die Erkenntnisse aus der vorherigen Phase zunächst reflektiert.

Aufgabe 2 (Reflexionsaufgabe) Dies erfolgt mithilfe von Aufgabe 2 (siehe Abbildung 9.18).

Abbildung 9.18

Aufgabe 2 der Auftriebsvorstellung (Reflexionsaufgabe)

Chloe und Jerome haben unterschiedliche Vorstellungen davon, wann etwas schwimmt oder sinkt. **Erkläre** ihnen mithilfe der Experimente aus ①a und ①b, wieso ihre Vorstellungen falsch sind.

Das **Volumen** ist entscheidend. Kleine Gegenstände steigen auf und schwimmen, während große Gegenstände sinken.



Die **Masse** ist entscheidend. Leichte Gegenstände steigen auf und schwimmen, während schwere Gegenstände sinken.

Die Impulse der fiktiven Charaktere Chloe und Jerome in Form von Aussagen sollen die Reflexion anregen, die zunächst innerhalb einer Murmelphase und anschließend im Plenum durchgeführt wird. Dadurch soll möglichst allen Lernenden die fehlende Eignung der beiden Vorstellungen, dass die Masse oder das Volumen entscheidend für das Schwimmverhalten ist, bewusst werden.

Aufgabe 3 Daran anknüpfend wird den Lernenden in Aufgabe 3 die Auftriebsvorstellung als eine fruchtbare Alternative zu den beiden Vorstellungen vorgestellt. Dies erfolgt mithilfe einer Simulation, in der die Lernenden schrittweise die Dichte als Antwort auf die Kernfrage „Wie kann man erklären ob etwas aufsteigt, schwebt oder sinkt?“ sowie die entsprechenden Regeln zum Aufsteigen, Schweben und Sinken entdecken (siehe Abbildung 9.19).

In der Simulation können verschiedene Eigenschaften eines Stoffes/Gegenstandes (blau dargestellt) sowie der umliegende Stoff (grau dargestellt) mithilfe von Schiebereglern verändert werden. Die Schieberegler sind dabei teilweise voneinander abhängig und passen sich dynamisch an. So bewirkt eine Änderung der Masse gleichzeitig eine Änderung des Volumens entsprechend der eingestellten Dichte

Abbildung 9.19

Aufgabe 3 der Auftriebsvorstellung



Tipp?

a) **Scanne** den unteren Kasten. !!!Stelle den grauen Würfel auf den Stoff „Wasser“ und den blauen Stoff/Gegenstand auf den Zustand „fest“ ein!!! Lass den blauen Stoff/Gegenstand aufsteigen , schweben  und sinken . Welche Eigenschaft musst du dafür verändern? **Kreuze** an.

Man muss ☐ die Masse (m) ☐ das Volumen (V) ☐ die Dichte (ρ) ☐ die Form verändern.

grauer Würfel		blauer Stoff/Gegenstand	
Zustand: gasförmig	$m = 0,0036 \text{ g}$	$m = 2 \text{ g}$	Zustand: fest
	$V = 20 \text{ cm}^3$	$V = 1 \text{ cm}^3$	
Stoff: Helium	$\rho = 0,0002 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$	$\rho = 2 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$	Form: Würfel



Tipp?

b) **Formuliere** mithilfe der Simulation Regeln für das Aufsteigen, Schweben und Sinken, indem du die Lücken vervollständigst.

Ist die _____ von dem blauen Gegenstand oder Stoff _____ als die _____ von dem grauen Würfel, **steigt** der blaue Gegenstand oder Stoff **auf**.



Ist die _____ von dem blauen Gegenstand oder Stoff _____ wie die _____ von dem grauen Würfel, **schwebt** der blaue Gegenstand oder Stoff.



Ist die _____ von dem blauen Gegenstand oder Stoff _____ als die _____ von dem grauen Würfel, **sinkt** der Gegenstand oder Stoff.



Tipp?

c) !!!Stelle den grauen Würfel auf den Stoff „Luft“ ein!!! **Überprüfe** mithilfe der Simulation, ob deine Regeln aus b) auch in gasförmigen Stoffen gelten.

und umgekehrt, da bei gleichbleibendem Stoff (und konstanten Bedingungen) eine Veränderung der Masse stets mit einer Veränderung des Volumens einhergeht. Weiterhin kann die Form lediglich verändert werden, wenn der Zustand auf *fest* eingestellt ist, da Flüssigkeiten und Gase keine definierte Form besitzen. Eine Änderung des Aggregatzustandes auf *gasförmig* führt zudem zu einer Anpassung des Wertebereichs des Dichteschiebereglers, da Gase eine deutlich geringere Dichte als Flüssigkeiten und Feststoffe besitzen. Die Eigenschaften Aggregatzustand und Form wurden bewusst ergänzt, um sowohl das Aufgreifen und Widerlegen weiterer alternativer Vorstellungen als auch das Entdecken der zuvor beschriebenen Zusammenhänge zwischen den Eigenschaften zu ermöglichen.

In Teilaufgabe 3a sollen die Lernenden zunächst herausfinden, welche Eigenschaft des blauen Stoffes/Gegenstandes verändert werden muss, um diesen zum Aufstei-

gen, Schweben oder Sinken zu bringen. Dazu muss der Stoff des grauen Würfels als erstes auf *Wasser* eingestellt werden. Dadurch soll den Lernenden bereits der Einfluss des umliegenden Stoffes für das Auftriebsverhalten deutlich werden. Durch das Ändern der Dichte des blauen Stoffes/Gegenstandes, können die Lernenden diese als für den Auftrieb verantwortliche Eigenschaft identifizieren. Zwar lässt sich aufgrund der geringen Dichte von Gasen der blaue Stoff auch durch die Änderung des Zustandes in *gasförmig* zum Aufsteigen, jedoch nicht zum Schweben bringen, sodass der Aggregatzustand als Lösung nicht in Frage kommt. Um jedoch ein voreiliges Festlegen auf die falsche Lösung auszuschließen, wurde der Aggregatzustand in der Aufgabenstellung auf *fest* gesetzt und als ankreuzbare Antwortmöglichkeit ausgeschlossen.

In Teilaufgabe 3b sollen die Lernenden nun die genauen Regeln für das Aufsteigen, Schweben und Sinken herausfinden und formulieren. Die Steig- bzw. Sinkgeschwindigkeit des blauen Stoffes/Gegenstandes passt sich dynamisch dem Betrag der Dichtedifferenz zwischen dem blauen Stoff/Gegenstand und dem umgebenden Fluid an. Dies soll die Lernenden insbesondere bei der Formulierung der Regel zum Schweben unterstützen.

Zuletzt sollen die Lernenden in Teilaufgabe 3c den Stoff des grauen Würfels auf *Luft* einstellen und so die Gültigkeit der zuvor aufgestellten Regeln in gasförmigen Stoffen überprüfen. Damit das gelingt, müssen die Lernenden zunächst den Aggregatzustand des blauen Stoffes ebenfalls auf *gasförmig* stellen, um geeignete Werte für die Dichte einstellen zu können. Dies soll einem bloßen Verstellen der Schieberegler ohne Betrachtung der Dichtewerte entgegenwirken.

Bezug zu Designprinzipien Insgesamt wird anhand der Simulation insbesondere das genetische Lernen (DP1) deutlich, da die Lernenden hier eigenständig die Auftriebsvorstellung der Dichte als Antwort auf die Kernfrage entdecken. Dies verdeutlicht, dass das Entdecken und das genetische Lernen nicht ausschließlich der Erkundungsphase vorbehalten ist, sondern durch starke Strukturierung und Systematisierung auch Teil der Erschließungsphase sein kann.

Durch das Aufgreifen verschiedener alternativer Vorstellungen in der Reflexionsaufgabe und der Simulation wird zudem das Prinzip des Anknüpfens an individuelle Vorstellungen verwirklicht (DP3).

Zusätzlich sind beispielsweise bei der Bearbeitung der Teilaufgabe 3b Wechsel zwischen verschiedenen Darstellungsebenen erforderlich, wie der dynamisch-bildlichen (Simulation), der statisch-bildlichen (Abbildungen neben den Regeln), der verbal-fachsprachlichen (Regeln) sowie der symbolischen (Größensymbole) Ebene (DP2).

4. Sichern In der Sicherungsphase der Auftriebsvorstellung werden unter aktiver Beteiligung die zentralen Erkenntnisse – in dem Fall die Auftriebsvorstellung sowie die Regeln zum Aufsteigen, Schweben und Sinken – der vorherigen Phase auf einem Merkzettel festgehalten (siehe Abbildung 9.20).

Abbildung 9.20

Merkzettel der Auftriebsvorstellung

Merkzettel

Wie kann man erklären, ob etwas aufsteigt, schwebt oder sinkt?

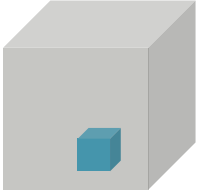
Antwort: Mithilfe der [Auftriebsvorstellung](#) der Dichte!



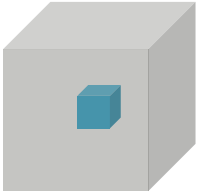
Auftriebsvorstellung

Die Dichte ist ein Maß dafür, ob etwas aufsteigt, schwebt oder sinkt.

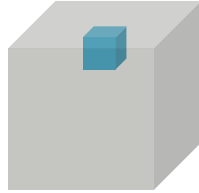
Regeln zum Aufsteigen, Schweben und Sinken



Ein Stoff oder Gegenstand _____, wenn seine Dichte _____ ist, als die Dichte von dem umliegenden Stoff.



Ein Stoff oder Gegenstand _____, wenn seine Dichte _____ ist, wie die Dichte von dem umliegenden Stoff.



Ein Stoff oder Gegenstand _____, wenn seine Dichte _____ ist, als die Dichte von dem umliegenden Stoff.

v1.4

Analog zur Würfelvorstellung befinden sich auf dem Merktzettel die Verbalisierung der Grundvorstellung (DP5) als Antwort auf die Kernfrage und leicht veränderte Aufgaben. Ebenso erfolgt eine Besprechung des Merktzettels im Plenum, eine Beantwortung der formulierten Fragen auf dem Jahrmarktbild sowie eine Überleitung zur Vertiefung der Auftriebsvorstellung oder Erarbeitung einer weiteren Grundvorstellung.

5. Vertiefen In der Vertiefungsphase wenden die Lernenden die erarbeiteten Erkenntnisse an und erweitern diese.

Analog zur Würfelvorstellung erfolgte die inhaltliche Auswahl der Aufgaben anhand der bei der Herleitung der Grundvorstellung identifizierten Subkategorien bzw. inhaltlichen Facetten. Zudem orientierte sich die Konzeption der Aufgaben möglichst nah an den Kriterien des intelligenten Übens.

Aufgabe 4 In Aufgabe 4 geht es um den Auftrieb in flüssigen Stoffen.

Teilaufgabe 4a dient als Einstieg in das Vertiefen und fokussiert die reine Anwendung der Auftriebsvorstellung, indem die Lernenden anhand der Dichte die Stoffe identifizieren sollen, die in Wasser aufsteigen.

In Teilaufgabe 4b beschäftigen sich die Lernenden mit einem Dichteturm (siehe Abbildung 9.21).

Im ersten Teil der Aufgabe sagen die Lernenden auf Basis der Dichte das Verbleiben von zwei Gegenständen vorher und überprüfen dies mithilfe eines Videos. Im zweiten Teil müssen die Lernenden umgekehrt auf Basis des Verbleibs von zwei Gegenständen auf deren Dichte schließen und mithilfe einer Dichtetabelle den jeweiligen Stoff ermitteln.

Aufgabe 5 Die Aufgabe 5 fokussiert den Auftrieb in gasförmigen Stoffen.

In Teilaufgabe 5a sollen die Lernenden dazu ein Experimentiervideo anschauen, in dem das Aufliegen von Seifenblasen auf einer Kohlenstoffdioxidschicht beobachtet werden kann. Die entsprechende Beobachtung notieren sie und erklären diese mithilfe der im Vergleich zur Luft höheren Dichte von Kohlenstoffdioxid.

In Teilaufgabe 5b wenden die Lernenden die Erkenntnisse aus der vorherigen Teilaufgabe an, indem sie selbst einen Experimentaufbau planen sollen, in welchem

Abbildung 9.21

Aufgabe 4b der Auftriebsvorstellung

- b) Unten ist ein „Dichteturm“. Dort sind Stoffe mit verschiedenen Dichten aufeinander geschichtet.
- i) **Schreibe** auf, auf welcher Schicht die Gegenstände schwimmen, wenn sie in den Dichteturm fallen. **Überprüfe** deine Lösung, indem du den Kasten scannst.
- ii) **Schreibe** auf, aus welchem Kunststoff die zwei Kugeln bestehen. **Nutze** die Tabelle auf der Website.

Dichte in $\frac{g}{cm^3}$:		i)		
Waschbenzin	0,79			
Motoröl	0,84			
Lampenöl	0,88			
Sonnenblumenöl	0,92			
Frostschutzmittel	1,01			
Spülmittel	1,03			
Zuckerlösung	1,10			
Honig	1,45			

i)		ii)	
Wachskerze $0,95 \frac{g}{cm^3}$			
Eiswürfel $0,91 \frac{g}{cm^3}$			
Schicht:			
Kunststoff:			

sie einen Ballon ähnlich wie die Seifenblasen zum Schweben bringen sollen (siehe Abbildung 9.22).

Abbildung 9.22

Aufgabe 5b der Auftriebsvorstellung mit idealtypischer Lösung

- b) **Plane** ein Experiment, in welchem du einen Ballon ähnlich wie in a) zum Schweben bringst. Unten findest du alle Materialien, die du verwenden darfst. **Skizziere** deinen Versuchsaufbau und **beschrifte** ihn. **Hinweis:** $\rho(\text{Wasserstoff}) = 0,00009 \frac{g}{cm^3}$, $\rho(\text{Helium}) = 0,00017 \frac{g}{cm^3}$, $\rho(\text{Luft}) = 0,0012 \frac{g}{cm^3}$

Wanne
Wasserstoff
Helium
Ballon
2 x Standfuß

Versuchsskizze:

Gasschicht aus Wasserstoff
Wanne
Ballon mit Helium
Standfuß

6. Vernetzen

In der Vernetzungsphase sollen die zunächst einzeln erarbeiteten Grundvorstellungen miteinander vernetzt werden, indem die Grundvorstellungen anhand komplexerer Aufgaben gezielt genutzt oder miteinander kombiniert werden.

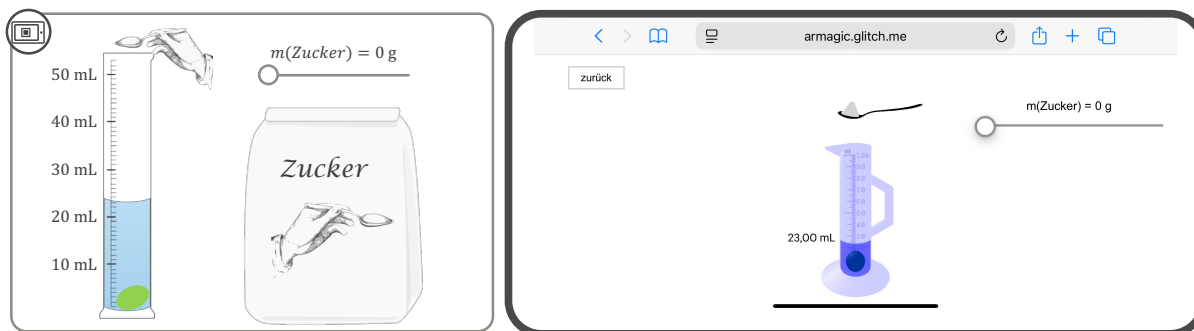
Insgesamt wurden dazu zwei komplexere Aufgaben entwickelt, die sich inhaltlich an den curricularen Vorgaben orientieren. Diese fordern je nach Schulform eine Behandlung der Dichte im Bereich der Stoffeigenschaften im Anfangsunterricht und/oder im Kontext der Dichteanomalie von Wasser in späteren Jahrgangsstufen (siehe Abschnitt 8.1). Daher wurde sowohl eine Aufgabe zur Dichteanomalie von Wasser als auch eine Aufgabe zum Lösen von Zucker entwickelt.

Die magische Traube In der Aufgabe „Die magische Traube“ geht es um Dichte-Veränderungen durch das Lösen von Zucker in Wasser. Lösevorgänge sind in den Kernlehrplänen im Bereich der Stoffe und Stoffeigenschaften und damit im Anfangsunterricht verortet (Ministerium für Schule und Bildung des Landes Nordrhein-Westfalen, 2011).

Die Aufgabe beinhaltet eine Simulation, in welcher per Schieberegler die Masse an Zucker eingestellt werden kann, die in einen mit 20 mL Wasser und einer Weintraube befüllten Messzylinder zugegeben wird (siehe Abbildung 9.23).

Abbildung 9.23

Simulation der Vernetzungsaufgabe „Die magische Traube“



Anmerkung. Links: Markerbild auf dem Arbeitsblatt, Rechts: Screenshot der Simulation.

In der Teilaufgabe a) sollen die Lernenden zunächst über den Füllstand des Messzylinders das Volumen der Weintraube bestimmen, während sie in Teilaufgabe b) in 1 g Schritten eine Zuckerlösung herstellen und Masse und Volumen der Zuckerlösung für jeden Schritt in einer Tabelle notieren. Die beiden Teilaufgaben dienen lediglich der Protokollierung des Versuchs und erfordern noch keine Grundvorstellung.

In Teilaufgabe c) sollen die Lernenden zunächst die Dichteveränderung der Zuckerlösung beschreiben und auf Basis dessen das Aufsteigen der Weintraube erklären. Die Beschreibung der Dichteveränderung benötigt die Würfelvorstellung und kann entweder qualitativ („Eine Zunahme der Masse bei annähernd gleich bleibendem Volumen führt zu einer Zunahme der Dichte.“) oder durch die Berechnung der Dichte in jedem Schritt erfolgen. Die Erklärung der aufsteigenden Weintraube erfordert hingegen die Auftriebsvorstellung.

In Teilaufgabe d) betrachten die Lernenden den Lösevorgang auf der submikroskopischen Ebene und sollen so die Dichteveränderung der Zuckerlösung erklären. Dazu wird der Lösevorgang makroskopisch in vier Schritten dargestellt und die submikroskopische Darstellung mithilfe von AR eingeblendet (siehe Abbildung 9.24). Dies soll eine Vernetzung der Johnstone-Ebenen durch die räumlich nahe Darstellung unterstützen. Die makroskopisch wahrnehmbaren Stoffe wurden jedoch in der submikroskopischen Darstellung entfernt, um ein Vermischen der Ebenen zu vermeiden. Die Bearbeitung der Aufgabe erfordert den gezielten Einsatz der Teilchenvorstellung der Dichte.

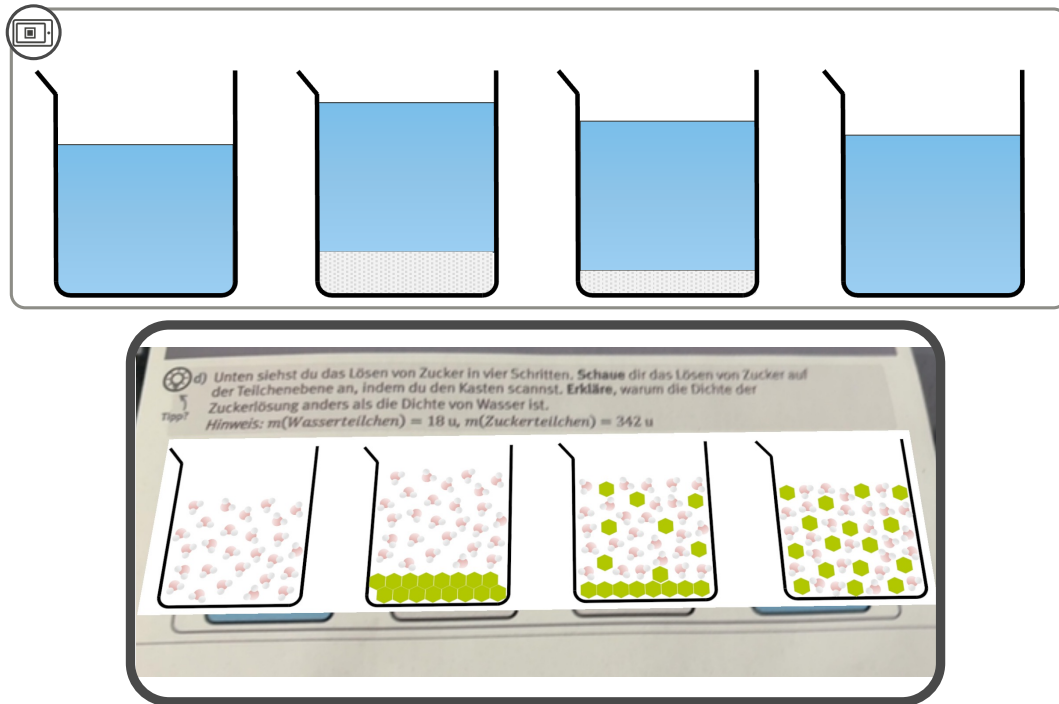
In Teilaufgabe e) sollen die Lernenden die Weintraube zum Schweben bringen und anschließend die Masse der Weintraube bestimmen. Die Lösung dieser Aufgabe spricht dabei drei Grundvorstellungen an. So wird zunächst die Auftriebsvorstellung benötigt, um zu erkennen, dass die Dichte der Weintraube im Zustand des Schwebens der Dichte der Lösung entspricht. Anschließend muss die Dichte der Lösung bzw. der Weintraube berechnet (Würfelvorstellung) und mit dieser das Volumen der Weintraube in die entsprechende Masse umgerechnet werden (Umrechnungsvorstellung).

Die Dichteanomalie von Wasser In der Aufgabe „Die Dichteanomalie von Wasser“ wird die Dichteanomalie von Wasser erarbeitet und vertieft.

Abbildung 9.24

Ausschnitt aus der Teilaufgabe d) der Vernetzungsaufgabe „Die magische Traube“

-  d) Unten siehst du das Lösen von Zucker in vier Schritten. **Schaue** dir das Lösen von Zucker auf der Teilchenebene an, indem du den Kasten scannst. **Erkläre**, warum die Dichte der Zuckerlösung anders als die Dichte von Wasser ist.
 Tipp?
Hinweis: $m(\text{Wasserteilchen}) = 18 \text{ u}$, $m(\text{Zuckerteilchen}) = 342 \text{ u}$



In der Teilaufgabe a) sollen die Lernenden anhand der Information, dass Eis auf Wasser schwimmt, drei submikroskopischen Darstellungen von Wasser die drei Aggregatzustände zuordnen (siehe Abbildung 9.25).

Dabei werden die Auftriebsvorstellung sowie die Teilchenvorstellung der Dichte angesprochen.

In der Teilaufgabe b) entdecken die Lernenden zunächst, dass eine Besonderheit von Wasser die höhere Dichte des flüssigen Zustands im Vergleich zum festen Zustand ist. Diese Erkenntnis sowie die Erkenntnisse aus Teilaufgabe a) werden anschließend mithilfe eines Lückentexts beschrieben (siehe Abbildung 9.26). Dabei werden erneut die Auftriebs- und Teilchenvorstellung der Dichte angesprochen.

In der Teilaufgabe c) sollen die Lernenden mithilfe der erarbeiteten Dichteanomalie die Problematik des Einfrierens von Wasserflaschen erklären. Da hier auf Basis der

Abbildung 9.25

Ausschnitt aus der Teilaufgabe a) der Vernetzungsaufgabe „Die Dichteanomalie von Wasser“

-  a) Unten siehst du Darstellungen von Wasser auf der Teilchenebene. **Ordne** den Darstellungen die Aggregatzustände *fest*, *flüssig* und *gasförmig* zu. **Begründe** deine Entscheidung.

Tipp?

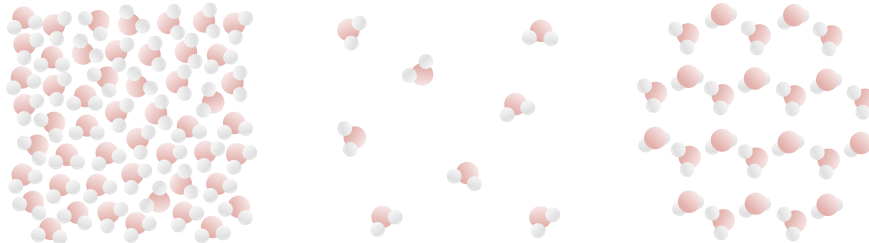


Abbildung 9.26

Teilaufgabe b) der Vernetzungsaufgabe „Die Dichteanomalie von Wasser“

-  b) Die unterschiedlichen Dichten von Wasser bei den Aggregatzuständen ist sehr ungewöhnlich. Deshalb spricht man auch von der „Dichteanomalie von Wasser“. **Schaue** dir die Tabelle zur Aufgabe auf der Website an. **Vergleiche** die Dichten der Stoffe mit den Dichten von Wasser. **Beschreibe** die Dichteanomalie von Wasser, indem du den Lückentext vervollständigst.

Tipp?

Die Dichte von Stoffen ist normalerweise im _____ Zustand größer als im _____ Zustand. Bei Wasser ist das umgekehrt. Dort ist die Dichte im _____ Zustand kleiner als im _____ Zustand. Das kann man daran erkennen, dass _____ Wasser im _____ Wasser schwimmt. Auf der Teilchenebene kann man das daran erkennen, dass sich die Teilchen in einer sechseckigen Struktur anordnen. Deshalb ist _____ und damit auch die Dichte im _____ Zustand kleiner als im _____ Zustand.

antiproportionalen Beziehung zwischen Dichte und Volumen argumentiert werden muss, wird die Würfelvorstellung angesprochen.

In der Teilaufgabe d) sollen die Lernenden das Volumen einer Eisscholle bestimmen, das zum Tragen eines 80 kg schweren Menschen benötigt wird. Neben der Auftriebsvorstellung werden bei dieser Aufgabe je nach Lösungsweg entweder die Würfel- oder die Umrechnungsvorstellung benötigt.

So kann mithilfe der Würfelvorstellung zunächst bestimmt werden, welche Masse ein Kubikzentimeterwürfel Eis tragen kann, sodass er gerade noch im Wasser schwimmt. Dazu wird die Dichte von Eis ($\rho_{\text{Eis}} = 0,9 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$) und die Dichte von Wasser ($\rho_{\text{Wasser}} = 1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$) miteinander in Beziehung gesetzt. Mithilfe eines Dreisatzes kann das Ergebnis anschließend auf 80 Kilogramm bezogen werden.

Ein alternativer Lösungsweg basiert auf der Umrechnungsvorstellung. Dabei wird

angenommen, dass die gesamte Dichte der Kombination aus Mensch und Eisscholle (ρ_{gesamt}) geringer sein muss als die Dichte von Wasser:

$$\rho_{\text{gesamt}} = \frac{m_{\text{gesamt}}}{V_{\text{Eis}}} = \frac{m_{\text{Mensch}} + m_{\text{Eis}}}{V_{\text{Eis}}} < 1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}.$$

Mithilfe der Umrechnungsvorstellung kann anschließend die gesamte Masse von Mensch und Eisscholle in das Volumen der Eisscholle umgerechnet werden:

$$\Leftrightarrow V_{\text{Eis}} > \frac{m_{\text{Mensch}}}{1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} - \rho_{\text{Eis}}}.$$

Bezug zu Designprinzipien Insgesamt müssen bei den beiden Aufgaben verschiedene Grundvorstellungen gezielt genutzt oder miteinander kombiniert sowie zwischen verschiedenen Johnstone-Ebenen gewechselt werden. Dies soll zu einer Vernetzung der Grundvorstellungen und Johnstone-Ebenen beitragen (DP4).

9.2.4 Zusammenfassung

Im vorherigen Abschnitt wurden die entwickelte Unterrichtskonzeption und begleitenden Lernmaterialien präsentiert. Dabei wurde die intendierte Funktion einzelner Designelemente beschrieben und exemplarisch dargelegt, inwiefern die Elemente die entsprechenden Designprinzipien konkretisieren.

Dies soll abschließend mithilfe der Tabelle 9.1 zusammengefasst werden.

Tabelle 9.1

Übersicht über die Designelemente der Unterrichtskonzeption und deren intendierte Funktion

Designelement	Funktionen
<i>Würfelvorstellung</i>	
Süßigkeitenexperiment	Entdecken der Würfelvorstellung auf gegenständlicher Ebene (DP1, DP2)
Aufgabe 1b „schwere‘ Stoffe“	Entdecken der Würfelvorstellung auf bildlicher und ggf. symbolischer Ebene (DP1, DP2)

Designelement	Funktionen
Erklärvideo mit begleitenden Aufgaben	Verknüpfen der erkundeten Inhalte mit dem Dichtebegriff, u.a. durch das Verbalisieren und Explizieren der Würfelvorstellung (DP5) sowie dem schrittweisen Übersetzen zwischen verschiedenen Darstellungs- und Johnstone-Ebenen (DP2, DP4)
Aufgabe 4 „Die Dichte bestimmen“	Schrittweises Übersetzen in verschiedene Darstellungs- und Johnstone-Ebenen (DP2, DP4) Aufgreifen der Verteilvorstellung der Division (DP3)
<i>Auftriebsvorstellung</i>	
Schokoriegelexperiment	Aktivieren und Widerlegen alternativer Vorstellungen durch Auslösen eines kognitiven Konflikts (DP3)
Simulation „Aufsteigen, Schweben und Sinken“	Entdecken der Auftriebsvorstellung (DP1) Aufgreifen und mögliches Widerlegen alternativer Vorstellungen (DP3) Wechseln zwischen verschiedenen Darstellungsebenen (DP2)
<i>Allgemein</i>	
Jahrmarktbild	Anknüpfen an Vorerfahrung der Lernenden (DP3) Fragen aufwerfen, die an Kernfragen heranführen und so eine Orientierung für den Lernprozess bieten (DP1) Überblick über Grundvorstellungen bieten (DP5) und Zusammengehörigkeit dieser verdeutlichen (DP4)

Designelement	Funktionen
Reflexionsaufgaben	Anregen zur Reflexion erkundeter Inhalte (DP1, DP3)
Merkzettel	Explizites Hervorheben und Sichern der Grundvorstellung – mittels Benennung, Verbalisierung (DP5) und Präsentation als Antwort auf die Kernfrage (DP1) – sowie Hervorheben und Sichern weiterer zentraler Inhalte
Vertiefungsaufgaben	Festigen und Anwenden der jeweiligen Grundvorstellungen; Teilweise Entdecken neuer Zusammenhänge (DP1) und Übersetzen in verschiedene Darstellungs- und Johnstone-Ebenen (DP2, DP4)
Vernetzungsaufgaben	Gezieltes Anwenden und Kombinieren verschiedener Grundvorstellungen und Johnstone-Ebenen (DP4)
Strukturierungselemente (Aufgabenüberschriften, gestufte Hilfen, ...)	Strukturieren und Unterstützen der genetischen Lernprozesse (DP1)
Bezeichnung „Würfel“- und „Auftriebsvorstellung“	Explizites Kommunizieren über Grundvorstellungen ermöglichen (DP5)

9.3 Optimierung der Lernmaterialien

Im Sinne des DBR-Ansatzes wurde die entwickelte Unterrichtskonzeption mit begleitenden Lernmaterialien mehrfach erprobt und in einem iterativen Prozess weiterentwickelt. In diesem Abschnitt soll dieser iterative Prozess näher beleuchtet und so die folgende Forschungsfrage beantwortet werden:

F2.4 Welche (Verständnis-)Schwierigkeiten lassen sich im Umgang mit den Lernmaterialien identifizieren und welche Optimierungen lassen sich daraus ableiten?

Dazu wird zunächst ein Überblick über die durchgeführten Erprobungen gegeben

(siehe Abschnitt 9.3.1). Anschließend werden exemplarische Verbesserungen präsentiert, die auf Basis der Erkenntnisse aus den Erprobungen vorgenommen wurden (siehe Abschnitt 9.3.2).

9.3.1 Übersicht über die Erprobungen

In der Tabelle 9.2 ist eine Übersicht über alle durchgeführten Erprobungen zur Evaluation der entwickelten Lernmaterialien dargestellt.

Tabelle 9.2*Übersicht über alle durchgeführten Erprobungen der entwickelten Lernmaterialien*

	Expertinnen- & Expertenreview	Pilotierung	Erprobung (E0)	Erprobung (E1)	Erprobung (E2)	Erprobung (E3)
Datum	Mai, 2023	Juni, 2023	Mai, 2023	Juni, 2023	November, 2023	Dezember, 2023
Inhalt	Alle Materialien	Würfelvorstellung mit Vertiefung	Würfel- und Auftriebsvorstellung ohne Vertiefung	Würfel- und Auftriebsvorstellung ohne Vertiefung	Würfel-, Auftriebs- und Umrechnungs-vorstellung ohne Vertiefung	Würfel- und Auftriebsvorstellung mit Vertiefung
Dauer	90 min	90 min	90 min	90 min	2x 90 min (inkl. Post-Test)	130 min
Ort, Schulform	Münster, Institut für Didaktik der Chemie	Münsterland, Gymnasium	Ruhrgebiet, Gymnasium	Ruhrgebiet, Gymnasium	Münsterland, Gesamtschule	Münster, Institut für Didaktik der Chemie, Gymnasium

	Expertinnen- & Expertenreview	Pilotierung	Erprobung (E0)	Erprobung (E1)	Erprobung (E2)	Erprobung (E3)
Teilnehmende (vollständig)	12, Expertinnen- und Experten	4, 6. und 8. Klasse	22 (15), 8. Klasse	26 (20), 8. Klasse	29 (18), 7. Klasse	26 (24), 7. Klasse
Datenerhebung	schriftliche Anmerkungen	Video- und Audiographie, Artefakte, Prä-Post-Test, Fragebogen	Beobachtungs- bögen, Artefakte, Prä-Post-Test, Fragebogen	Video- und Audiographie, Artefakte, Prä-Post-Test, Fragebogen	Video- und Audiographie, Artefakte, Prä-Post-Test, Fragebogen	Video- und Audiographie, Artefakte, Prä-Post- Follow-up-Test, Fragebogen
Fokus	Umsetzbarkeit	Umsetzbarkeit in Selbsterarbeitung	Umsetzbarkeit im Klassenverband	Optimierung	Funktionalität und Wirksamkeit	Funktionalität und Wirksamkeit
Forschungsfrage	F2.4	F2.4	F2.4	F2.4	F3.1, F3.2, F3.3	F3.1, F3.2, F3.3
Kapitel	9.3	9.3	9.3	9.3	10.2, 10.3, 10.4	10.2, 10.3, 10.4

Der Fokus der Erprobungen lag auf der Würfel- und Auftriebsvorstellung. Dies lässt sich damit begründen, dass sich aufgrund der Fülle an entwickelten Materialien auf die Erprobung eines Teils der Materialien beschränkt werden musste. Es wurde sich auf die Würfel- und Auftriebsvorstellung beschränkt, da dies die in Schulbüchern am häufigsten angesprochenen Grundvorstellungen sind (siehe Abschnitt 8.2). Aufgrund des Stellenwertes der Schulbücher für die Unterrichtsplanung (Beerwinkel et al., 2007), ist davon auszugehen, dass Lehrkräfte die Materialien zu diesen Grundvorstellungen eher annehmen, als zu den anderen Grundvorstellungen.

Darüber hinaus wurden bereits in den anfänglichen Erprobung mit dem Fokus auf die Umsetzbarkeit und die Optimierung der Unterrichtskonzeption Erhebungsinstrumente zur Analyse von Lernprozessen und der Effektivität der Unterrichtskonzeption, wie beispielsweise Prä-Post-Tests, eingesetzt. Dafür wurde sich aus den folgenden Gründen bewusst entschieden:

1. Der frühzeitige Einsatz der Erhebungsinstrumente ermöglicht es, die Verständlichkeit einzelner Items zu überprüfen. Dadurch können Anpassungen vorgenommen werden, um sicherzustellen, dass die für den jeweiligen Forschungszweck geeignet sind.
2. Das Sammeln von Daten über mehrere Erprobungsphasen hinweg schafft eine umfassendere Datengrundlage. Dadurch könnte beispielsweise die Kategorienbildung bei der Auswertung offener Items erleichtert werden.
3. Auch ohne eine systematische Auswertung in den frühen Phasen können die Erhebungsinstrumente auf mögliche Schwierigkeiten im Lernprozess hinweisen und so zur Optimierung der Lernmaterialien beitragen.

Im Folgenden wird das methodische Vorgehen der einzelnen Erprobungen im Detail vorgestellt. Lediglich die Erprobungen E2 und E3 werden erst in Abschnitt 10.1 beschrieben, da der Fokus dort weniger auf der Optimierung der Lernmaterialien, sondern vielmehr auf der Analyse der Wirksamkeit und Lernprozesse lag.

Expertinnen- und Expertenreview Im Mai 2023 wurde ein Expertinnen- und Expertenreview in Form einer Gremiumbegutachtung durchgeführt, um die erste Version der entwickelten Lernmaterialien zu evaluieren.

Dazu nahmen 12 Expertinnen und Experten aus dem Institut für Didaktik der Chemie der Universität Münster, bestehend aus zwei Professorinnen, drei akademischen Rätinnen und Räten sowie sieben Promovierenden, an der Begutachtung teil. Die Teilnehmenden verfügen über umfassendes Fachwissen und Erfahrungen im Bereich der chemiedidaktischen Forschung. Der Großteil von ihnen beschäftigt sich zudem ebenfalls mit der Entwicklung innovativer Unterrichtskonzepte im Rahmen des DBR-Ansatzes, sodass sie auf vielfältige Erfahrungen mit Entwicklungs- und Evaluationsprozessen zurückgreifen und gezielte Rückmeldungen zu den Materialien geben können. Darüber hinaus haben fünf der Expertinnen und Experten bereits den Vorbereitungsdienst für ein Lehramt absolviert, wodurch sie zusätzlich wertvolle Erfahrungen aus der Bildungspraxis einbringen.

Aufgrund der Fülle an Materialien wurden die Expertinnen und Experten in vier Gruppen aufgeteilt, wobei jede Gruppe neben einer Lehrkräftehandreichung die Materialien zur Würfelvorstellung und einer weiteren Grundvorstellung erhielten. Insgesamt wurde so die Würfelvorstellung von vier Gruppen, die Auftriebsvorstellung von zwei Gruppen und die Teilchen- und Umrechnungsvorstellung jeweils von einer Gruppe evaluiert. Gründe für diese Aufteilung sind zum einen die zentrale Bedeutung der Würfelvorstellung (siehe Abschnitt 8.3) und zum anderen der Fokus auf die Würfel- und Auftriebsvorstellung in den weiteren Erprobungen.

Nach einer kurzen Einführung, in der die vier Grundvorstellungen sowie die Phasierung der Unterrichtskonzeption präsentiert wurden, begann zunächst die Evaluation des Jahrmarktbildes. Dazu wurde das Jahrmarktbild mithilfe des digitalen Tools Flinga präsentiert und das Feedback der Expertinnen und Experten dokumentiert. Anschließend sollten die Kleingruppen die Materialien zu den Grundvorstellungen durchgehen und Feedback mit ggf. konkreten Verbesserungsvorschlägen notieren. Das Feedback umfasste die Aufgabenstellung und- schwierigkeit, den Umgang mit der Website, die Experimente sowie die Gestaltung der Materialien. Die Gesamtdauer des Reviews betrug 90 min.

In einem nächsten Schritt wurde das Feedback nach den jeweiligen Aufgaben geordnet in eine Tabelle übertragen (siehe Anhang A.1) und anhand dessen die Materialien weiterentwickelt.

Pilotierung Im Rahmen einer in das vorliegende Projekt integrierten Masterarbeit (Hartmann, 2024) wurde im Juni 2023 eine erste Pilotierung der Lernmaterialien zur Würfelvorstellung durchgeführt. Ziel dieser Pilotierung war die generelle Überprüfung der Umsetzbarkeit und Verständlichkeit der entwickelten Materialien durch die Lernenden. Die Pilotierung fand aufgrund von äußeren Bedingungen entgegen der Planung zeitlich nach der ersten Erprobung (E0) statt, sodass bereits auf Basis der Erkenntnisse aus der Erprobung die Materialien optimiert und in der Pilotierung eingesetzt wurden.

An der Pilotierung nahmen vier Lernende teil: zwei aus der 6. Jahrgangsstufe und zwei aus der 8. Jahrgangsstufe. Obwohl die 7. Jahrgangsstufe die eigentliche Zielgruppe darstellt, konnten bedingt durch die freiwillige Teilnahme keine Lernenden dieser Klasse gewonnen werden. Die jüngeren Teilnehmenden hatten noch keinen Chemieunterricht erhalten, während die älteren bereits die Dichte behandelt hatten.

Im Rahmen der Pilotierung bearbeiteten die Lernenden das Jahrmarktbild sowie die Materialien zur Würfelvorstellung der Dichte inklusive Vertiefungsaufgaben. Die Bearbeitung fand in Zweiergruppen statt, die aus Lernenden derselben Jahrgangsstufe gebildet wurden. Die Lernenden wurden dazu angehalten, miteinander zu kommunizieren und gemeinsam Lösungen zu erarbeiten. Die Bearbeitung der Materialien erfolgte eigenständig durch die Lernenden, ohne Plenumsphasen, um Schwierigkeiten im Umgang mit den Aufgaben und Aufgabenstellungen besser identifizieren zu können, ohne dass die Interaktionen von der Lehrkraft beeinflusst werden. Die gesamte Bearbeitung dauerte 90 Minuten und wurde durch den Einsatz von GoPro-Kameras und Diktiergeräten zur Aufnahme des Arbeitsprozesses begleitet. Die GoPro-Kameras wurden mithilfe eines Kopfgurtes auf den Köpfen der Lernenden befestigt, um die Bearbeitung der Materialien aus Sicht der Lernenden zu dokumentieren.

Vor und nach der Bearbeitungsphase wurde jeweils ein Test (10 min) durchgeführt, um den Lernzuwachs der Lernenden zu erfassen. Ergänzend dazu beurteilten die Lernenden die Materialien nach dem Post-Test anhand eines Evaluationsbogens. Die Instrumente für den Prä- und Post-Test sowie den Evaluationsbogen wurden von dem betreuten Masteranden entwickelt und unterscheiden sich daher von den Instrumenten, die in den anderen Erprobungen dieses Projekts verwendet wurden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden somit lediglich die Videoaufnahmen sowie ergänzend dazu die Artefakte als Datengrundlage für die Evaluation der Materialien verwendet.

Die Analyse der Videos wurde von einer studentischen Hilfskraft unterstützt, indem sie mithilfe von MAXQDA alle Videosequenzen codierte, in denen die Lernenden Schwierigkeiten im Umgang mit dem Material zeigten (*selection before selection*, siehe Abschnitt 4.3). Zur Minderung des Risikos eines Übersehens von Schwierigkeiten wurde die Hilfskraft angewiesen, auch subtile Anzeichen von Missverständnissen der Lernenden zu codieren. Im Anschluss daran wurden die codierten Segmente gesichtet, paraphrasiert und in einer Tabelle festgehalten (siehe Anhang A.1). Basierend auf diesen Erkenntnissen erfolgte eine gezielte Weiterentwicklung der Lernmaterialien.

Erprobung (E0) Im Mai 2023 fand eine erste Erprobung der Materialien an einem Gymnasium im Ruhrgebiet statt. Ziel dieser Erprobung war die Überprüfung der Umsetzbarkeit der Unterrichtskonzeption und Lernmaterialien im Klassenverband. An der Erprobung nahmen insgesamt 22 Lernende der 8. Jahrgangsstufe teil. Dabei ist anzumerken, dass aufgrund struktureller Bedingungen an dieser Schule die Lernenden erst in dieser Jahrgangsstufe mit dem Chemieunterricht beginnen und die Dichte zu diesem Zeitpunkt noch nicht behandelt hatten.

Die Erprobung fand in einer Doppelstunde (90 min) im regulären Chemieunterricht statt. Um in diesem Zeitraum sowohl die Würfel- als auch die Auftriebsvorstellung (je ca. 45 min) erproben zu können, wurden die Materialien ohne die Vertiefungsphase erprobt. Der Unterrichtsverlaufsplan ist im Anhang dargestellt (siehe Anhang E.1). Der Unterricht wurde von einer Praxissemesterstudierenden durchgeführt, die in der Klasse zuvor bereits mehrfach unterrichtet hatte. So konnte gewährleistet werden, dass zum einen die Erprobung in einem für die Lernenden vertrauten Klassenkontext stattfand und zum anderen sich die forschende Person auf die Beobachtung von Schwierigkeiten im Umgang mit den entwickelten Materialien konzentrieren konnte. Die Praxissemesterstudierende wurde zuvor in mehreren Treffen mit der forschenden Person ausführlich über den Unterrichtsverlauf und die Materialien gebrieft, um eine möglichst wie intendierte Unterrichtsdurchführung sicherzustellen.

Zur Überprüfung der Umsetzbarkeit der Unterrichtskonzeption und Lernmaterialien wurde eine Beobachtung anhand eines Beobachtungsbogens durchgeführt. Dieser setzte sich zusammen aus (a) der Phasierung und dem intendierten Unterrichtsverlauf gemäß des Unterrichtsverlaufsplans, (b) einer Spalte zur Eintragung der benötigten Zeit einzelner Unterrichtssequenzen sowie (c) einer Spalte zur Notation beobachteter Schwierigkeiten und Fragen der Lernenden (siehe Abbildung 9.27).

Abbildung 9.27

Ausschnitt aus dem in E0 verwendeten Beobachtungsbogen

Beobachtungsbogen

Phase	Inhalt	Uhrzeit	Beobachtungen
Fragen	Lehrkraft zeigt das „Jahrmarkt-Bild“ mittels Flinga und stellt den Auftrag, Fragen zu den Situationen mit den Sprechblasen zu formulieren		
	Lernende senden Fragen an Flinga, die sie sich zu den jeweiligen Situationen im Bild stellen.		
	Lehrkraft liest exemplarisch zwei bis drei Fragen vor.		
	Der Fokus der ersten Stunde wird auf die Fragen zu der Situation „Stärke-Wettbewerb“ gelenkt ...		

Die Beobachtung wurde von der forschenden Person, einer studentischen Hilfskraft sowie der regulären Chemielehrkraft der Klasse durchgeführt.

Zudem wurden erste Versionen des Prä-Post-Tests (siehe Abschnitt 10.4.1) sowie des Fragebogens (siehe Abschnitt 10.3.1) eingesetzt. Der Prä-Test wurde eine Woche vor und der Post-Test eine Woche nach der Erprobung im regulären Chemieunterricht geschrieben mit einer Dauer von jeweils ca. 15 min. Der Fragebogen

dauerte ca. 5 min und wurde unmittelbar am Ende der Erprobung innerhalb der Doppelstunde durchgeführt.

Zur Datenaufbereitung wurden die Beobachtungen zusammengefasst und in eine Tabelle (siehe Anhang A.1) übertragen. Anschließend wurden die Artefakte der Lernenden, die Fragebögen und die Prä-Post-Tests auf Auffälligkeiten analysiert, die auf Schwierigkeiten hinweisen könnten. Basierend auf diesen Erkenntnissen erfolgte eine gezielte Weiterentwicklung der Lernmaterialien.

Erprobung (E1) Im Juni 2023 fand eine weitere Erprobung an dem Gymnasium im Ruhrgebiet mit einer anderen Klasse statt. Der Fokus lag hier auf der Optimierung der Unterrichtskonzeption und Lernmaterialien. Insgesamt nahmen 26 Lernende der 8. Jahrgangsstufe teil.

Der Ablauf der Erprobung erfolgte analog zur vorherigen Erprobung. So wurden die gleichen Grundvorstellungen in einer Doppelstunde (90 min) im regulären Chemieunterricht erprobt, der Unterricht von der Praxissemesterstudierenden durchgeführt, Prä- und Post-Test jeweils eine Woche vor bzw. nach der Erprobung im regulären Chemieunterricht sowie der Fragebogen unmittelbar am Ende der Erprobung durchgeführt.

Statt der Beobachtung wurden jedoch Video- und Audiographien mithilfe von Stativkameras, auf dem Kopf der Lernenden befestigten GoPro-Kameras und Diktiergeräten angefertigt, um einen tieferen Einblick in die Bearbeitung der Materialien und mögliche Schwierigkeiten zu erlangen. Aufgrund der begrenzten Anzahl an Kameras wurden die Lernenden in Zweier- und teilweise Dreiergruppen eingeteilt und mit einer Kamera ausgestattet.

Das Einverständnis zur Video- und Audiographie wurde zuvor von den Erziehungsberechtigten mithilfe einer Einverständniserklärung eingeholt. Insgesamt erteilten die Erziehungsberechtigten von 14 Lernenden ihr Einverständnis. Die verbliebenen Lernenden wurden entsprechend so angeordnet, dass sie auf den Kameras nicht zu sehen waren.

Die Auswertung der Daten erfolgte ähnlich zu der vorherigen Erprobung und Pilotierung. So wurde analog zur Pilotierung eine Voranalyse der Videos von der studentischen Hilfskraft durchgeführt, in welcher Schwierigkeiten codiert wurden. Diese wurden im Anschluss von der forschenden Person gesichtet, paraphrasiert

und in einer Tabelle festgehalten (siehe Anhang A.1). Zudem wurden die Artefakte, Prä-Post-Tests und Fragebögen auf Auffälligkeiten analysiert, die auf Schwierigkeiten hinweisen könnten. Auf Basis dieser Erkenntnisse erfolgte die Optimierung der Unterrichtskonzeption.

9.3.2 Exemplarische Verbesserungen

Aufgrund der Vielzahl an Optimierungen, die die Lernmaterialien im Verlauf der Erprobungen erfahren hat, kann nicht auf jede dieser Optimierungen im Detail eingegangen werden. Weiterhin wäre es nicht zielführend, zunächst alle identifizierten Schwierigkeiten und Anmerkungen aus den Erprobungen zu präsentieren, da die nur in Kombination mit den entsprechenden Versionen des Lernmaterials zu verstehen sind.

Um dennoch Transparenz für die iterative Optimierung zu schaffen, werden im Folgenden exemplarisch einzelne Optimierungen präsentiert und auf Basis der Erkenntnisse aus den Erprobungen begründet. Eine ausführliche Dokumentation der vorgenommenen Optimierungen auf Basis der gewonnenen empirischen Erkenntnisse ist im Anhang A.1 zu finden.

Simulation zum Aufsteigen, Schweben und Sinken Die Simulation zum Aufsteigen, Schweben und Sinken (Aufgabe 3) wurde grundlegend überarbeitet, da die Lernenden im Umgang mit der ersten Version der Simulation (siehe Abbildung 9.28) große Schwierigkeiten zeigten (E0 und E1).

Viele Lernende wussten nicht, was mit der Simulation zu tun ist oder übersprangen sie. Zudem führten die Beobachtungen häufig zu Fehlinterpretationen, wie der Annahme, dass der Aggregatzustand, der Salzgehalt des Wassers oder die Masse entscheidend für das Auftriebsverhalten sei. In einigen Fällen zogen die Lernenden gar keine Schlussfolgerungen.

Um diesen Schwierigkeiten zu begegnen, wurde die Simulation stärker strukturiert und vereinfacht (siehe Abbildung 9.19 in Abschnitt 9.2.3). Dazu wurde der Schieberegler zur Anpassung des Aggregatzustandes des grauen Würfels entfernt sowie in der Aufgabenstellung ergänzt, dass der Stoff des grauen Würfels auf *Wasser* und der Aggregatzustand des blauen Stoffs auf *fest* eingestellt werden soll. Dadurch werden die Lernenden bereits explizit zur Interaktion mit der Simulation aufgefordert.

Abbildung 9.28

Ausschnitt aus der ersten Version der Aufgabe 3 der Würfelvorstellung

 Zuvor hast du das Schwimmverhalten von Objekten in Flüssigkeiten untersucht. Dabei hast du gelernt, dass weder die Masse, noch das Volumen für das Schwimmverhalten entscheidend ist **(1 b)**. In dieser Aufgabe erfährst du, wann etwas allgemein in Flüssigkeiten oder Gasen aufsteigt, schwebt oder sinkt. **Löse** dazu **a)** und **b)** mithilfe der Simulation.

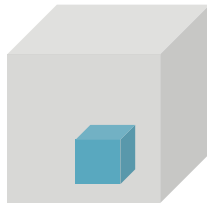
Tipp?

grauer Würfel

Zustand: gasförmig $m = 0,0258 \text{ g}$

Stoff: Luft $V = 20 \text{ cm}^3$

$\rho = 0,0013 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$



blauer Stoff/Gegenstand

$m = 2 \text{ g}$ Zustand: fest

$V = 1 \text{ cm}^3$ Form: Würfel

$\rho = 2 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$

a) Welche Vokale (a,e,i,o,u) sind hinter den Symbolen? **Vervollständige** den Merksatz.

 D  cht  st  n M  ß d  für,  b  tw  s

 fst  gt, schw  bt  d  r s  nkt.

b) Formuliere die Regeln, wann der blaue Stoff/Gegenstand aufsteigt, schwebt oder sinkt.

Ist die _____ von dem blauen Gegenstand oder Stoff _____ als die _____ von dem grauen Würfel, **steigt** der blaue Gegenstand oder Stoff **auf**.

Dies soll einem Überspringen der Simulation entgegenwirken sowie die ungewollte Schlussfolgerung verhindern, dass der Aggregatzustand für das Auftriebsverhalten verantwortlich ist.

Damit die Lernenden dennoch anhand der Simulation erkennen können, dass die Erkenntnisse nicht nur in flüssigen, sondern auch in gasförmigen Stoffen gelten, wurde die Teilaufgabe c) ergänzt. In dieser sollen die Lernenden die Regeln für das Aufsteigen, Schweben und Sinken in gasförmigen Stoffen überprüfen.

Die Teilaufgabe a) wurde ebenfalls verändert, sodass sie nun über der Simulation steht und die Lernenden durch ein Ankreuzen explizit auffordert, die für das Auftriebsverhalten verantwortliche Eigenschaft zu identifizieren. Dadurch soll den Lernenden der Arbeitsauftrag deutlicher und ein Überspringen der Simulation vermieden werden.

Des Weiteren wurde ein Schieberegler für die Dichte ergänzt, sodass die Dichte nun direkt, statt indirekt über die Masse und das Volumen verändert werden kann. Bei der Veränderung der Masse ändert sich das Volumen nun entsprechend der einge-

stellten Dichte mit und umgekehrt. Dadurch soll die Identifikation der Dichte als verantwortliche Stoffeigenschaft deutlich vereinfacht und falsche Schlussfolgerungen vermieden werden.

Reduzierung von AR Im Expertinnen- und Expertenreview sowie bei der Pilotierung wurde die Unhandlichkeit der AR-Inhalte angemerkt und ersichtlich. So ist es beispielsweise nicht möglich, gleichzeitig mit einer Simulation zu arbeiten und Lösungen zu notieren. Darüber hinaus ist insbesondere bei größeren Endgeräten eine längere Auseinandersetzung mit den Simulationen aufgrund der langen Haltezeit ermüdend. Zudem ist das Fixieren des Markers mit der Kamera bei gleichzeitigem Interagieren mit der Simulation insbesondere bei Endgeräten mit größeren Bildschirmen erschwert.

Aus diesem Grund wurde die AR-Funktion bei allen Simulationen entfernt, sodass nach einmaligem Scannen die Simulationen dauerhaft geöffnet bleiben und so das Endgerät neben das Arbeitsblatt gelegt und die Simulation bearbeitet werden kann. Bei kürzeren, nicht interaktiven Videos sowie Inhalten zur Vernetzung der Johnstone-Ebenen wurde die AR-Funktion aus motivationalen Gründen und bei Letzterem insbesondere aufgrund des potenziellen didaktischen Nutzens zur Vernetzung der Ebenen beibehalten.

Unterschied zwischen Masse und Dichte Im Post-Test der Erprobung E0 zeigte sich bei mehreren Lernenden eine mangelnde Differenzierung zwischen der Masse und der Dichte. Beispielsweise begründete S17 das Schwimmen eines Holzwürfels wie folgt: „Der Holzwürfel hat eine kleinere Dichte und ist somit leichter sodass er auf Wasser schwimmen kann“ (S17_E0_Post). Ähnlich begründete S2, dass ein kleineres Stück Eisen eine geringere Dichte habe als ein großes Stück: „Das kleinere Stück hat weniger dichte als das große eis den es hat weniger masse“ (S2_E1_Post). S20 setzte mit der Antwort „Dichte ist so ähnlich wie masse“ (S20_E0_Post) Dichte und Masse sogar annähernd gleich.

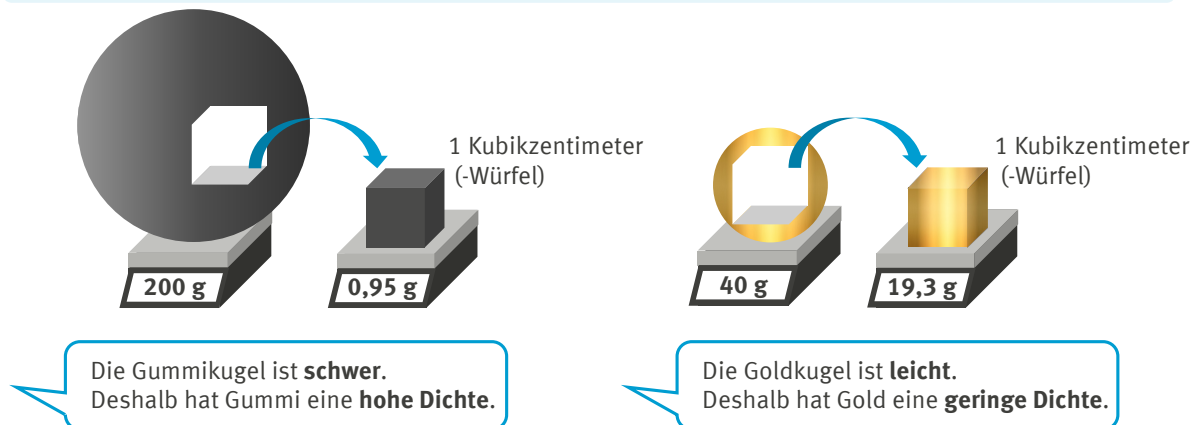
Aus diesem Grund wurde im Rahmen der Würfelvorstellung zunächst die Aufgabe 3b (siehe Abbildung 9.29) ergänzt sowie der Hinweis „*Schwer* ist nicht gleich *dicht*!“ auf dem Merkzettel hinzugefügt (siehe Abbildung 9.12 in Abschnitt 9.2.3).

In den Videos der Erprobung E1 zeigte sich jedoch, dass die Lernenden teilweise die Aufgabe nicht bearbeiteten oder übersprangen. Aussagen der Lernenden,

Abbildung 9.29

Erste Version der Aufgabe 3b der Würfelvorstellung

- b) Warum ist *schwer* nicht gleich *dicht*? **Schau** dir unten das Beispiel an und **lies** dir die falschen Aussagen durch. **Tausche** dich mit deiner Partnerin/ deinem Partner darüber aus.



wie beispielsweise „Hä, da muss ich ja nix machen!“ (S7_E1_Vid), „Ist das auch eine Aufgabe?“ (S5_E1_Vid) und „Ich weiß nicht genau, was wir jetzt schreiben sollen!“ (S2_E1_Vid) verdeutlichen, dass ein Arbeitsauftrag zur mündlichen Bearbeitung der Aufgabe teilweise nicht als Arbeitsauftrag wahrgenommen wurde. Deshalb wurde die Aufgabe durch einen kurzen, schriftlichen Teil ergänzt (siehe Abbildung 9.10 in Abschnitt 9.2.3).

Optische Anpassungen Auf Basis der Anmerkungen im Expertinnen- und Expertenreview wurden die Materialien optisch grundlegend überarbeitet. So wurden beispielsweise Symbole zu den Phasen sowie Umrahmungen innerhalb von Aufgaben entfernt, um eine optische Entlastung zu schaffen. Zudem wurden Linien und Kästchen überwiegend durch weiße Kästen ersetzt, um neben der optischen Entlastung eine Beeinflussung der Lernenden zugunsten einer rechnerischen oder schriftlichen Lösung zu vermeiden. Ein Vergleich der ersten mit der aktuellen Version eines Arbeitsblattes in Abbildung 9.30 soll einen Eindruck für die optischen Anpassungen vermitteln.

Zudem lassen sich in der Abbildung auch kleinere, inhaltliche Anpassungen erkennen, wie beispielsweise eine veränderte Kernfrage, die Ergänzung von bestimmten und unbestimmten Artikeln bei Aufgabe 1a sowie die Ergänzung der Übersetzungen der Größensymbole in Aufgabe 1b. Dies soll einen Einblick in die vielen wei-

Abbildung 9.30

Vergleich der ersten Version (links) mit der aktuellen Version (rechts) eines Arbeitsblattes der Würfelvorstellung

Wie kann man die Masse von Stoffen vergleichen?
Erkunden

① „schwere“ Stoffe

a) Welche Süßigkeit besteht aus dem „schwersten“ Stoff? **Finde** es heraus und **beschreibe** dein Vorgehen!
Dafür brauchst du: Waage, Messer, Schneidebrett, Marshmallow, Lakritz, Speckmaus





Marshmallow Lakritzbonbon Speckmaus

So bin ich vorgegangen: _____

Das habe ich beobachtet/gemessen: _____

Deshalb besteht _____ aus dem schwersten Stoff.

b) Unten siehst du Objekte aus verschiedenen Stoffen. Welcher ist der „schwerste“ Stoff? **Begründe!**
Hinweis: Deine Erkenntnisse aus Aufgabe a) können dir helfen.



Glas
 $V = 10 \text{ cm}^3$
 $m = 25 \text{ g}$



Kohlenstoff
 $V = 8 \text{ cm}^3$
 $m = 16 \text{ g}$



Nickel
 $V = 2 \text{ cm}^3$
 $m = 18 \text{ g}$

Notizen: _____

Antwort: _____

E2 ©Institut für Didaktik der Chemie | Universität Münster | Pascal Meyer & Annette Marohn | v1.0

Wie kann man die Masse von Stoffen verhältnismäßig vergleichen?
Erkunden

① „schwere“ Stoffe

a) Welche Süßigkeit besteht aus dem „schwersten“ Stoff? **Finde** es heraus.
Dafür brauchst du: eine Waage, eine Schere, ein Marshmallow, ein Lakritzbonbon, eine Speckmaus.





das Marshmallow das Lakritzbonbon die Speckmaus

Notizen: _____

_____ besteht aus dem „schwersten“ Stoff.

b) Unten siehst du Objekte aus verschiedenen Stoffen. Welcher ist der „schwerste“ Stoff? **Begründe.**
Hinweis: Deine Erkenntnisse aus Aufgabe a) können dir helfen.



Anzahl der Kubikzentimeter(-Würfel) entspricht dem Volumen
Glas
 $V = 10 \text{ cm}^3$
 $m = 25 \text{ g}$



Kohlenstoff
 $V = 8 \text{ cm}^3$
 $m = 16 \text{ g}$



Nickel
 $V = 2 \text{ cm}^3$
 $m = 18 \text{ g}$

Notizen: _____

Begründung: _____

1 E ©Institut für Didaktik der Chemie | Universität Münster | Pascal Meyer & Annette Marohn | v1.4

teren Optimierungen der Lernmaterialien bieten, auf die in dieser Arbeit nicht im Detail eingegangen werden kann.

10 Wirksamkeit und Funktionsweisen der Unterrichtskonzeption

In diesem Kapitel wird die Wirksamkeit und Funktionsweise der Unterrichtskonzeption und dazugehöriger Lernmaterialien unter der folgenden Forschungsfrage evaluiert:

F3 Inwiefern sind Funktionalität und Wirksamkeit der Unterrichtskonzeption mit begleitenden Lernmaterialien gegeben?

Dazu wird zunächst der Ablauf der dafür durchgeführten Erprobungen dargestellt (siehe Abschnitt 10.1). Anschließend werden die Artefakte der Lernenden analysiert (siehe Abschnitt 10.2), die Bewertungen der Unterrichtskonzeption mit begleitenden Lernmaterialien durch die Lernenden untersucht (siehe Abschnitt 10.3) sowie die Lernzuwächse ermittelt (siehe Abschnitt 10.4). Auf Basis dieser Ergebnisse erfolgt dann abschließend die Beantwortung der Forschungsfrage (siehe Abschnitt 10.5).

Zu Beginn jedes Abschnitts werden die entsprechenden Forschungs- und Subforschungsfragen angeführt.

10.1 Ablauf der Erprobungen

10.1.1 Erprobung (E2)

Im November 2023 wurde an einer Gesamtschule im Münsterland eine Erprobung durchgeführt, die sich auf die Analyse von Lernprozessen sowie die Wirksamkeit der Unterrichtskonzeption mit begleitenden Lernmaterialien konzentrierte.

Ursprünglich war geplant, die Erprobung in zwei Klassen der 7. Jahrgangsstufe durchzuführen. Für jede Klasse standen jeweils zwei Doppelstunden von 90 min zur Verfügung, die mit einem Abstand von einer Woche durchgeführt wurden. Dies bedeutete eine erheblich längere Unterrichtszeit im Vergleich zu anderen Erprobungen. Aufgrund dieser zusätzlichen Zeit sollte neben der Würfel- und Auftriebsvorstellung in einer Klasse die Teilchenvorstellung und in der anderen Klasse die Umrechnungsvorstellung erprobt werden, um deren Umsetzbarkeit zu erheben. Aufgrund eines konferenzbedingten Ausfalls des Nachmittagsunterrichts konnte jedoch lediglich eine Klasse teilnehmen, was die Fokussierung auf die Umrechnungsvorstellung erforderte. Insgesamt nahmen 29 Lernende der 7. Jahrgangsstufe an der Erprobung teil.

Der Unterricht wurde von der forschenden Person selbst durchgeführt. Im Folgenden wird ein Überblick über den Ablauf und Inhalte der Erprobung gegeben. Ein detaillierter Unterrichtsverlaufsplan ist im Anhang zu finden (siehe Anhang E.2):

- Prä-Test (15 min)
Pause (eine Woche)
- Würfelvorstellung (60 min):
 - Formulieren von Fragen und Fokussieren auf den Stärkewettbewerb (Jahrmarktbild)
 - Problemaufriss zu Süßigkeitenexperiment
 - Erkunden der Lösungsidee zur Kernfrage (Aufgabe 1)
 - Reflektieren der erkundeten Erkenntnisse (Aufgabe 2)
 - Erschließen der Würfelvorstellung und Formel zur Berechnung der Dichte (Aufgaben 3 und 4)
 - Sichern und Besprechen der zentralen Inhalte (Merkzettel)
 - Beantworten der Fragen zum Stärkewettbewerb (Jahrmarktbild)
- Auftriebsvorstellung (20 min):
 - Fokussieren auf den Ballonstand und das Entenfischen (Jahrmarktbild)
 - Lesen der Geschichte zum Schokoriegelexperiment

- Erkunden des Schwimmverhaltens der Schokoriegel (Aufgabe 1)
- Zwischenevaluation (5 min)
Pause (eine Woche)
- Auftriebsvorstellung (45 min):
 - Wiederholen der Würfelvorstellung (Jahrmarktbild) und der Ergebnisse des Schokoriegelexperiments
 - Reflektieren der Ergebnisse des Experiments und Widerlegen individueller Vorstellungen (Aufgabe 2)
 - Erschließen der Auftriebsvorstellung (Aufgabe 3)
 - Sichern und Besprechen der zentralen Inhalte (Merkzettel)
 - Beantworten der Fragen zum Entenfischen und dem Ballonstand (Jahrmarktbild)
- Umrechnungsvorstellung (25 min):
 - Fokussieren auf den Süßigkeitenstand (Jahrmarktbild)
 - Problemaufriss zum Rezept
 - Erkunden der Lösungsidee zur Kernfrage und Umrechnen der Rezeptangaben (Aufgabe 1)
 - Reflektieren der Lösungsideen und Umschreiben des Rezepts
 - Beantworten der Fragen zum Süßigkeitenstand (Jahrmarktbild)
- Post-Test und Evaluation (20 min)

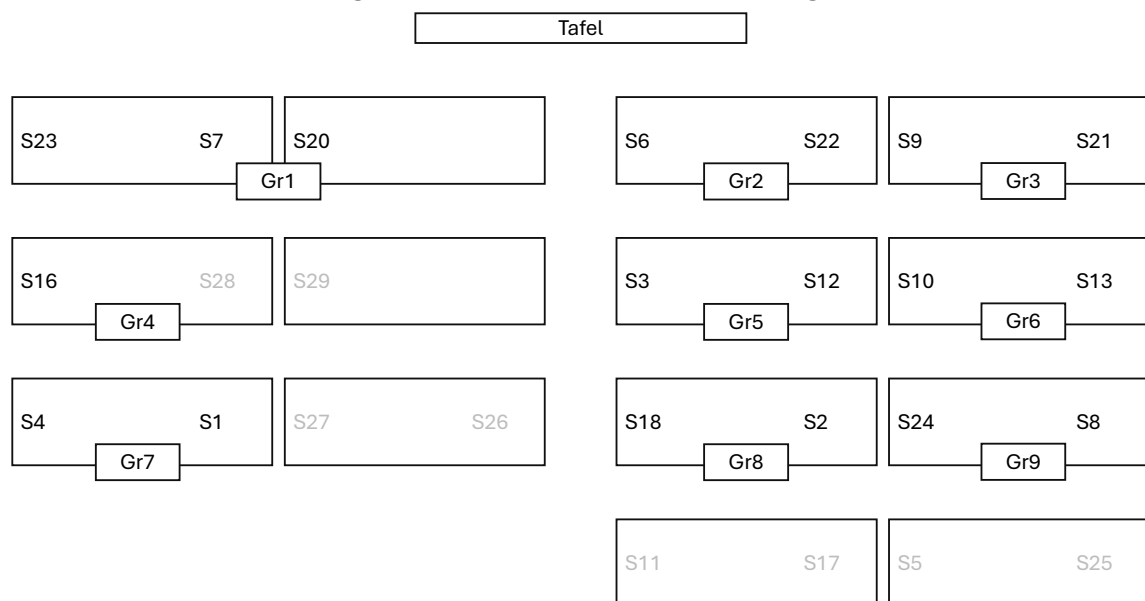
Daraus wird ersichtlich, dass die Erarbeitung der Würfel- und Auftriebsvorstellung deutlich länger als geplant dauerte (vgl. Unterrichtsverlaufsplan E2, Anhang E.2). Dies ist auf den erhöhten Zeitbedarf der Lernenden bei der Bearbeitung der Aufgaben zurückzuführen. Insgesamt standen dadurch nur 25 min für die Umrechnungsvorstellung zur Verfügung, sodass die Phase des Erschließens und die Bearbeitung und Besprechung des Merktzettels entfallen ist. Da die geplanten Aktivitäten zu dieser Grundvorstellung somit nicht im vorgesehenen Umfang durchgeführt werden konnten und aussagekräftige Ergebnisse fehlen, wird im Rahmen dieser Arbeit nicht auf die Umrechnungsvorstellung eingegangen.

Zur Analyse der Lernprozesse im Umgang mit den Lernmaterialien sowie deren Wirksamkeit wurden ein Prä- und Post-Test sowie ein Evaluationsbogen eingesetzt, ergänzt durch Video- und Audiographien. Letztere erfolgten mithilfe von Stativkameras, auf dem Kopf der Lernenden befestigten GoPro-Kameras und Diktiergeräten. Aufgrund der begrenzten Anzahl an Kameras wurden die Lernenden in Zweier- und teilweise Dreiergruppen eingeteilt und mit einer Kamera ausgestattet. Das Einverständnis zur Video- und Audiographie wurde vor der Erprobung von den Erziehungsberechtigten eingeholt. Insgesamt erteilten die Erziehungsberechtigten von 23 Lernenden ihr Einverständnis. Die verbliebenen Lernenden wurden entsprechend so angeordnet, dass sie auf den Kameras nicht zu sehen waren.

In Abbildung 10.1 ist ein Überblick über die Anordnung der Lernenden sowie Angaben über die Vollständigkeit der Datensätze dargestellt.

Abbildung 10.1

Überblick über die Anordnung der Lernenden und die Vollständigkeit der Datensätze in E2



Anmerkung. Schwarz: vollständiger Datensatz; hellgrau: unvollständiger Datensatz.

Falls nicht anders beschrieben, wurden für die Analysen in den folgenden Kapiteln lediglich vollständige Datensätze ($N = 18$) verwendet.

Insgesamt gab es bei der Durchführung der Erprobung spezifische Schwierigkeiten, die eine Analyse der Wirksamkeit und Lernprozesse erschwerten:

- *Unterrichtsausfall:* Aufgrund eines krankheitsbedingten Ausfalls der Chemielehrkraft sowie eines allgemeinen Mangels an Chemielehrkräften an der Schule hatte die Klasse in den sieben Wochen vor der Erprobung keinen Chemieunterricht. Die Doppelstunde unmittelbar vor der Erprobung stellte somit die erste Chemiestunde nach dieser längeren Pause dar. Der Großteil dieser Stunde war organisatorischen Aspekten sowie der Durchführung des Prä-Tests gewidmet. Die verbleibenden 30 Minuten wurden von der Lehrkraft für eine mündliche Wiederholung des Stoffbegriffs und einiger Stoffeigenschaften genutzt. Diese begrenzte Unterrichtszeit führte möglicherweise zu einer unzureichenden Vorbereitung der Lernenden auf die Erprobung, da ein solides Verständnis des Stoffbegriffs für die Teilnahme vorausgesetzt wurde.
- *Methodische Inkonsistenz:* Aufgrund des Designs der Erprobung ist die Vergleichbarkeit zu anderen Erprobungen sowie innerhalb der Erprobung erschwert. So erfolgte aufgrund der Trennung der Auftriebsvorstellung eine Wiederholung der Inhalte in der zweiten Doppelstunde, die in den anderen Erprobungen nicht gegeben war. Zudem erfolgte der Post-Test unmittelbar nach der Erarbeitung der Auftriebs- und Umrechnungsvorstellung, jedoch eine Woche nach der Würfelvorstellung, was die Vergleichbarkeit der Ergebnisse innerhalb und zwischen den Erprobungen einschränkte.
- *Störungen während des Post-Tests:* Während der Durchführung des Post-Tests kündigte die Chemielehrkraft an, dass die, die fertig sind, in die Pause gehen dürfen. Dies hat zu Unruhen in der Klasse und einem frühzeitigen Beenden des Tests bei einigen Lernenden geführt.

10.1.2 Erprobung (E3)

Im Dezember 2023 wurde eine Erprobung mit 26 Lernenden einer 7. Klasse eines Gymnasiums aus dem Tecklenburger Land durchgeführt. Ziel der Erprobung war die Analyse von Lernprozessen sowie die Wirksamkeit der eingesetzten Lernmaterialien. Die Erprobung fand in den Räumen des Instituts für Didaktik der Chemie

an der Universität Münster statt. Dies ermöglichte eine zeitlich flexiblere Gestaltung der Erprobung. Die Tische wurden in Reihen angeordnet, um eine möglichst authentische Unterrichtssituation zu schaffen.

Eine Übersicht über den Ablauf und die Inhalte der Erprobung wird im Folgenden dargestellt. Auf Basis der Erkenntnisse der vorherigen Erprobung wurden die eingeplanten Zeiten für einzelne Phasen angepasst und zwei Sprinteraufgaben entwickelt. Ein detaillierter Unterrichtsverlaufsplan inklusive der Sprinteraufgaben ist im Anhang zu finden (siehe Anhang E.3):

- Prä-Test (15 min)
- Würfelvorstellung (70 min):
 - Formulieren von Fragen und Fokussieren auf den Stärkewettbewerb (Jahrmarktbild)
 - Problemaufriss zu Süßigkeitenexperiment
 - Erkunden der Lösungsidee zur Kernfrage (Aufgabe 1, ggf. Sprinteraufgabe 1)
 - Reflektieren der erkundeten Erkenntnisse (Aufgabe 2)
 - Erschließen der Würfelvorstellung und Formel zur Berechnung der Dichte (Aufgaben 3 und 4)
 - Sichern und Besprechen der zentralen Inhalte (Merkzettel)
 - Beantworten der Fragen zum Stärkewettbewerb (Jahrmarktbild)
 - Vertiefen der Würfelvorstellung (Aufgaben 5a, 7 und 6b)

Pause (15 min)

- Auftriebsvorstellung (60 min):
 - Fokussieren auf den Ballonstand und das Entenfischen (Jahrmarktbild)
 - Lesen der Geschichte zum Schokoriegelexperiment
 - Erkunden des Schwimmverhaltens der Schokoriegel (Aufgabe 1, ggf. Sprinteraufgabe 2)
 - Reflektieren der Ergebnisse des Experiments und Widerlegen individueller Vorstellungen (Aufgabe 2)

- Erschließen der Auftriebsvorstellung (Aufgabe 3)
- Sichern und Besprechen der zentralen Inhalte (Merkzettel)
- Beantworten der Fragen zum Entenfischen und dem Ballonstand (Jahrmarktbild)
- Vertiefen der Auftriebsvorstellung (Aufgaben 4 und 5)
- Post-Test und Evaluation (20 min)
 - Pause (fünf Wochen)*
- Follow-up-Test (15 min)

Aufgrund einer Busverspätung standen für die Erarbeitung der Grundvorstellungen insgesamt nur 130 statt 150 min zur Verfügung. Dadurch mussten die jeweiligen Vertiefungsphasen vorzeitig beendet werden, sodass einige Lernende nicht alle Aufgaben bearbeiten konnten.

Analog zur vorherigen Erprobung wurden die Lernprozesse video- und audiografisch mithilfe von Stativkameras, auf dem Kopf der Lernenden befestigten GoPro-Kameras und Diktiergeräten festgehalten. Das Einverständnis dazu gaben die Erziehungsberechtigten bei allen 26 Lernenden. Zudem wurden zur Analyse der Wirksamkeit ein Fragebogen und ein Test im Prä-/Post-/Follow-up-Design eingesetzt. In Abbildung 10.2 ist ein Überblick über die Anordnung der Lernenden sowie Angaben über die Vollständigkeit der Datensätze dargestellt.

Falls nicht anders beschrieben, wurden für die Analysen in den folgenden Kapiteln lediglich vollständige Datensätze ($N = 24$) verwendet.

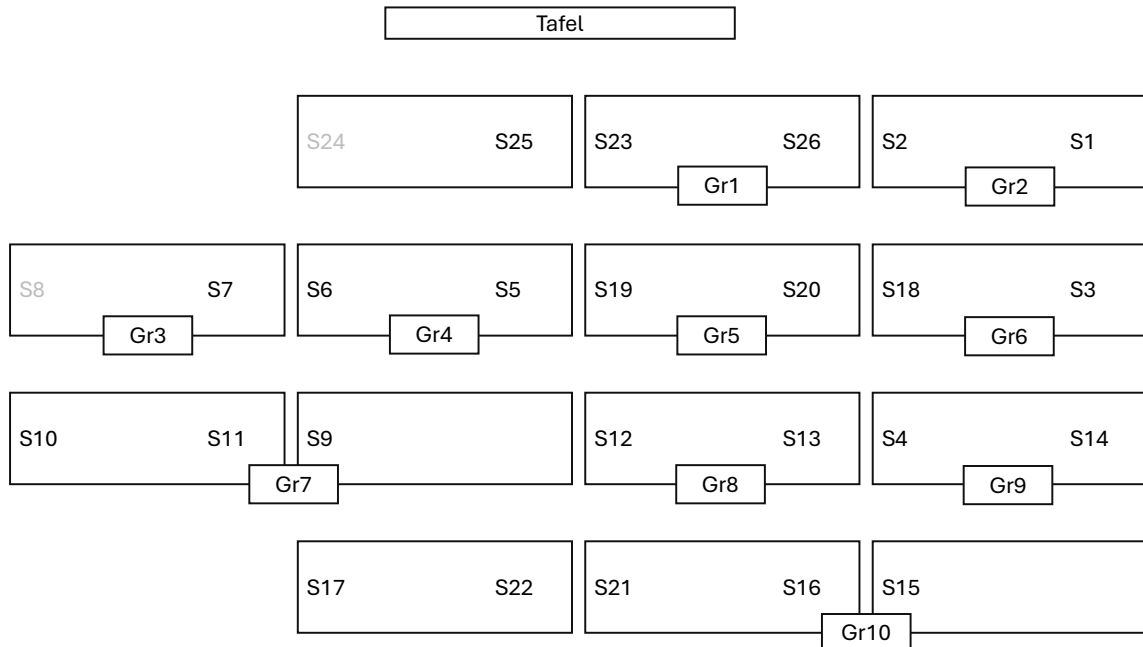
Die Gruppen S24/S25 sowie S17/S22 wurden aus Videoanalysen ausgeschlossen, da es entweder aufgrund von fehlender Kommunikation infolge erheblicher Sprachbarrieren (S24: DaZ-Schüler) oder der ausschließlichen Kommunikation in einer nicht analysierbaren Fremdsprache (S17/S22) keine auswertbaren Gruppengespräche gab.

10.1.3 Anmerkung

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Erprobung E3 als Haupterprobung betrachtet, da sie im Vergleich zu den Schwierigkeiten der Erprobung E2 unter repräsentativeren Bedingungen durchgeführt wurde. Dies bietet eine aussagekräftigere Grundlage für

Abbildung 10.2

Überblick über die Anordnung der Lernenden und die Vollständigkeit der Datensätze in E3



Anmerkung. Schwarz: vollständiger Datensatz; hellgrau: unvollständiger Datensatz.

die Bewertung der Wirksamkeit und Funktionalität der Unterrichtskonzeption. Die in den folgenden Abschnitten dargestellten Ergebnisse beziehen sich daher primär auf die Erprobung E3.

Nichtsdestotrotz werden die Ergebnisse der Erprobung E2 ergänzend betrachtet, um die Erkenntnisse aus E3 zu validieren und zu kontrastieren. Dies ermöglicht erste Hinweise auf die Robustheit der Ergebnisse aus E3.

Die folgenden Abschnitte 10.2 bis 10.4 folgen einer einheitlichen Struktur. Zunächst werden die Erhebungsinstrumente und die Datenauswertung beschrieben. Anschließend erfolgt die Ergebnisdarstellung und -diskussion der Haupterprobung E3. Zum Abschluss wird jeweils ein Vergleich zu den Ergebnissen der Erprobung E2 gezogen.

10.2 Bearbeitung der Lernmaterialien

F3.1 Inwiefern bearbeiten die Lernenden die Materialien wie intendiert?

F3.1.1 Inwiefern stimmen die von den Lernenden erstellten Lösungen mit der angestrebten Musterlösung überein und welche typischen Abweichungen von der intendierten Lösung sind erkennbar?

F3.1.2 Welche Fragen stellen Lernende zu den Situationen auf dem Jahrmarktbild und inwiefern werden diese im Plenum beantwortet?

F3.1.3 Welche unterschiedlichen Lösungsstrategien verwenden Lernende bei der Bestimmung des „schwereren“ Stoffes (Aufgabe 1b, Würfelvorstellung)?

F3.1.4 Welche Vermutungen stellen Lernende zum Auftriebsverhalten der Schokoriegeln auf (Aufgabe 1a und 1b, Auftriebsvorstellung) und wie begründen sie diese?

F3.1.5 Inwiefern werden die Reflexionsaufgaben zur Würfel- und Auftriebsvorstellung im Plenum beantwortet?

F3.1.6 Inwiefern überprüfen die Gruppen die Regeln zum Aufsteigen, Schweben und Sinken in gasförmigen Stoffen (Aufgabe 3c, Auftriebsvorstellung)?

10.2.1 Methodik

F3.1.1 Zur Beantwortung der Frage *F3.1.1* wurde zunächst eine Musterlösung der Lernmaterialien erstellt, die der intendierten Bearbeitung der Aufgaben entspricht. Zur Datenaufbereitung wurden die Artefakte der Lernenden eingescannt, in MAXQDA importiert und die Antworten der Lernenden als Codes festgehalten.

Anschließend wurden die Codes je nach Übereinstimmung mit der intendierten Lösung mit 0 Punkten (falsch), 0,5 Punkten (teilweise richtig) und 1 Punkt (richtig) bewertet und dies in der Codebezeichnung vermerkt. Eine detaillierte Übersicht über die Codehäufigkeiten befindet sich im Anhang F. Die Musterlösung wurde um die als teilweise richtig bewerteten Antworten ergänzt und befindet sich im Anhang D.4. Mithilfe von MAXQDA-Stats wurden nun für jede Person die Gesamtpunkt-

zahl jeder (Teil-)Aufgabe aus der Summe der Codehäufigkeit multipliziert mit der jeweiligen Punktzahl bestimmt.

Aufgrund der während der Erprobung E3 beobachteten hohen Ablenkung bei einigen Lernenden wurden zur besseren Einordnung der Ergebnisse die Phasen der Ablenkungen mithilfe der Videos gruppenweise codiert. Das Ziel der Codierung war nicht die detaillierte Analyse der individuellen Ablenkungen. Dies wäre aufgrund der Tatsache, dass pro Gruppe nur eine Kamera zur Verfügung stand, nicht möglich gewesen. Stattdessen sollte die Codierung lediglich eine grobe Quantifizierung und damit einen ersten Hinweis auf die Ablenkungszeit der Lernenden ermöglichen. Dementsprechend wurde auf eine Überprüfung der Intercoderreliabilität verzichtet und die Codierung der Ablenkungen bewusst vereinfacht. So wurde eine Ablenkung erst dann codiert, wenn die Lernenden mindestens 20 s nicht mit dem Material beschäftigt waren. Umgekehrt wurde ein Ende der Ablenkung erst nach 20 s Beschäftigung mit dem Material codiert.

Die Codierung wurde von einer studentischen Hilfskraft durchgeführt, um Verzerrungen durch die Beobachtungen des Autors während der Erprobung zu vermeiden. Die genauen Codierregeln für die Codierung der Ablenkungen befindet sich im Anhang C.3. Die erreichten Punktzahlen für jede Person sowie die prozentuale Ablenkungszeit zur Gesamtinterventionsdauer (132 min) sind im Anhang F zu finden.

Einige Aufgaben wurden nicht bepunktet, sondern alternativ analysiert (F3.1.2 - F3.1.6). Darauf wird im Folgenden näher eingegangen.

F3.1.2 So wurden die formulierten Fragen der Lernenden zu den Situationen auf dem Jahrmarktbild mithilfe eines Screenshots der Flinga-Website dokumentiert und anschließend deskriptiv analysiert. Hinsichtlich der Beantwortung der Fragen im Plenum wurden die entsprechenden Plenumsphasen mithilfe des Programms MacWhisper automatisch transkribiert. Die Transkripte wurden anschließend überarbeitet und sind im Anhang A.4 zu finden. Für die Ergebnisdarstellung wurden die Plenumsphasen anhand der Transkripte paraphrasiert.

F3.1.3 Ebenfalls wurde bei Aufgabe 1b der Würfelvorstellung auf eine Bepunktung der Begründungen verzichtet, um die Vielfalt der Lösungsstrategien zu wür-

digen und keine Gewichtung vorzunehmen. Stattdessen wurden die Lösungsstrategien induktiv codiert. Neben der Art der Strategie wurde dabei auch erfasst, inwiefern die Lernenden ihre Strategie mithilfe des Volumens oder dessen Konkretisierung in Form von Kubikzentimeterwürfeln beschreiben.

Um einen umfassenden Überblick über die Vielfalt an möglichen Lösungsstrategien bei dieser Aufgabe zu gewinnen, wurden für die Auswertung die Artefakte aus allen vier Erprobungen (E0-E3) einbezogen. Dies umfasste 22 aus E0, 21 aus E1, 21 aus E2, 26 aus E3 und damit insgesamt 90 Artefakte. Die Berücksichtigung der größeren Anzahl an Begründungen erleichterte zudem die Bildung von Kategorien durch die Erkennung von Mustern und Gemeinsamkeiten.

Die Daten wurden von einem zweiten Codierer anhand des entwickelten Codierleitfadens in zwei Schritten codiert. Im ersten Schritt wurden die Begründungen der Erprobung E1 (Anzahl der Codiereinheiten: 20; 31,7 %) codiert, da hier von dem ersten Codierenden zuvor nahezu alle verschiedenen Codes mindestens einmal vergeben wurden und somit möglichst das gesamte Kategoriensystem abgebildet wurde. Im zweiten Schritt wurden die Antworten der verbliebenen Erprobungen (Anzahl der Codiereinheiten: 43; 68,3 %)¹³ codiert. Nach beiden Schritten wurde die Intercoder-Reliabilität, gemessen mit dem Kappa-Koeffizienten nach Brennan und Prediger (1981), bestimmt. Nicht-Übereinstimmungen wurden im Sinne des konsensuellen Codierens (Kuckartz & Rädiker, 2022) zwischen den beiden Codierenden diskutiert. Anschließend wurde eine gemeinsame Codierung vereinbart (siehe Anhang F) und ggf. der Codierleitfaden ausdifferenziert. Der finale Codierleitfaden mit Kennzeichnung der vorgenommenen Änderungen ist dem Anhang C.2 zu entnehmen.

Im ersten Schritt betrug die Intercoder-Reliabilität .77 für die Art und 1.00 für die Beschreibung der Strategie. Im zweiten Schritt betrug sie .97 für die Art und 1.00 für die Beschreibung der Strategien. Die Werte im zweiten Schritt können als nahezu perfekte bis perfekte Übereinstimmung interpretiert werden (Landis & Koch, 1977).

F3.1.4 Des Weiteren wurde beim Schokoriegelexperiment zur Auftriebsvorstellung auf eine Bepunktung verzichtet, da hier das Ziel verfolgt wird, den Lernenden

¹³Die Gesamtanzahl der Codiereinheiten unterscheidet sich von der Gesamtanzahl der berücksichtigten Artefakte, da nicht alle Lernenden eine Antwort oder eine Begründung angegeben haben.

die Grenzen alternativer Vorstellungen zum Auftriebsverhalten aufzuzeigen. Eine Bewertung richtiger Antworten ist daher weder möglich noch zielführend. Stattdessen wurde eine deskriptive Analyse der Vermutungen und Begründungen der Lernenden vorgenommen. Die zentralen Punkte der Begründungen wurden mithilfe von MAXQDA als Codes paraphrasiert und deren Häufigkeiten in einer Tabelle zusammengefasst.

F3.1.5 Die Plenumsphasen zu den Reflexionsaufgaben wurden ebenfalls deskriptiv analysiert. Zur Datenaufbereitung wurde eine automatische Transkription entsprechender Abschnitte aus den Videos mithilfe des Programms MacWhisper durchgeführt und die Transkripte anschließend von einer studentischen Hilfskraft überarbeitet (siehe Anhang A.4). Für die Ergebnisdarstellung wurden die Plenumsphasen anhand der Transkripte paraphrasiert.

F3.1.6 Zuletzt wurde die Aufgabe 3c zur Auftriebsvorstellung nicht bepunktet, da die Lernenden hier keine Antwort notieren, sondern lediglich die Regeln zum Auftriebsverhalten in gasförmigen Stoffen mithilfe der Simulation überprüfen sollten. Stattdessen wurden die Videos der Gruppen analysiert, um einen Eindruck zu erlangen, inwiefern die Gruppen die Überprüfung der Regeln durchführen.

10.2.2 Ergebnisse

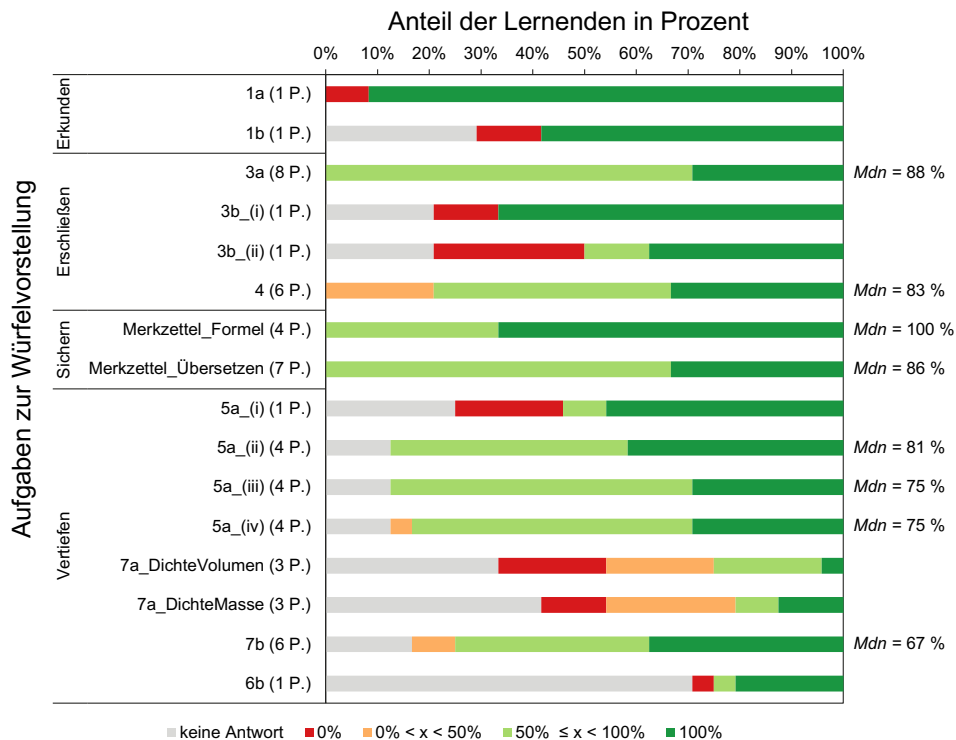
Übereinstimmungen und Abweichungen zwischen den Antworten der Lernenden und der Musterlösung (F3.1.1)

Würfelvorstellung Die Punkteverteilung der Aufgaben zur Würfelvorstellung sind in der Abbildung 10.3 dargestellt.

Insgesamt ist festzustellen, dass bis auf drei (Teil-)Aufgaben in der Vertiefungsphase bei allen Aufgaben mindestens die Hälfte der Lernenden 50 % der Punkte oder mehr erreichten. Bei 10 von 16 Aufgaben lag die erreichte Punktzahl bei mindestens 75 % der Punkte. Zudem wurden bei jeder (Teil-)Aufgabe von mindestens einer Person die volle Punktzahl erreicht. Im Folgenden werden die einzelnen Aufgaben im Detail betrachtet.

Abbildung 10.3

Verteilung der erreichten Punkte in Prozent der maximalen Punktzahl bei den Aufgaben zur Würfelvorstellung (E3)



Anmerkung. Prozentangaben in der Legende beziehen sich auf den Anteil der erreichten Punkte im Verhältnis zur Maximalpunktzahl der jeweiligen (Teil-)Aufgabe. Die Maximalpunktzahl ist in Klammern angegeben. Für Aufgaben mit mehr als vier möglichen Punkten ist zur besseren Interpretierbarkeit zusätzlich der Median der erreichten Prozentpunkte (inklusive fehlender Antworten) angegeben.

In der Phase des Erkundens gaben fast alle Lernenden korrekt an, dass das Lakritzbonbon aus dem „schwersten“ Stoff besteht (1a). Zwei Lernende gaben jedoch „Marshmallow“ als Lösung an. Die Bestimmung des schwersten Stoffes anhand von Würfeldarstellungen (1b) gelang nur etwas mehr als der Hälfte der Lernenden. Der Großteil der übrigen Lernenden gab keine Antwort.

Die Lücken zum Erklärvideo (3a) in der Phase des Erschließens wurden von allen Lernenden zu mindestens 50 % und von mindestens der Hälfte der Lernenden zu 88 % richtig ausgefüllt. Die fehlenden Punkte sind insbesondere auf zwei Lücken zurückzuführen, die im Vergleich zu den anderen Lücken besonders häufig offen gelassen wurden (siehe Abbildung 10.4): So gaben acht Lernende nicht an, dass

die Dichte eine *Stoffeigenschaft* ist. Die Beschriftung des griechischen Buchstabens „ ρ “ mit „Dichte“ wurde von 12 Lernenden nicht vorgenommen.

Abbildung 10.4

Lösung von S15_E3 zur Aufgabe 3a der Würfelvorstellung als Beispiel für die am häufigsten freigelassenen Lücken

Die Dichte ist eine .
 Sie gibt an, wie viel ein Kubikzentimeter (Würfel) eines Stoffes wiegt.

Beispiel

1 Kubikzentimeter (-Würfel)

Gummi 0,95 g

Wir beobachten: Ein Kubikzentimeter(-Würfel) Gummi wiegt 0,95 Gramm.

Wir sagen: Die Dichte von Gummi beträgt 0,95 Gramm pro Kubikzentimeter.

Wir schreiben: ρ ist der griechische Buchstabe „Rho“ von Gummi $\rho(\text{Gummi}) = 0,95 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ pro Gramm Kubikzentimeterwürfel

Etwas weniger als die Hälfte der Lernenden hat bei der Unterscheidung zwischen „dicht“ und „schwer“ (3b) keine Punkte erreicht. Drei Lernende gaben an, dass die 200 g schwere Gummikugel „dichter“ und nicht „schwerer“ als die 40 g schwere Goldkugel sei (i). Für die Begründung, warum Gold dennoch dichter als Gummi ist (ii), erhielten zwei Lernende nur 0,5 Punkte. Sie erkannten zwar richtig, dass das gleiche Volumen betrachtet werden muss, gaben allerdings „Dichte“ statt „Gewicht“ oder „Masse“ an. Zum Beispiel erklärte eine Person, dass Gold dichter ist, weil „es pro Kubikzentimeter einer größere Dichte hat“ (S3_E3_Art). In sieben Fällen wurde nicht auf das gleiche Volumen Bezug genommen. Zum Beispiel erklärte eine Person, dass Gold dichter ist, weil „es mehr wiegt“ (S23_E3_Art).

Der Lückentext zur Bestimmung der Dichte (4) wurde von dem Großteil der Lernenden (ca. 80 %) zu mindestens 50 % richtig bearbeitet. Mindestens die Hälfte der Lernenden erreichte mindestens 83 % der Punkte. Die gegebenen Antworten

und deren Häufigkeiten für die jeweiligen Lücken bzw. Ankreuzaufgaben sind in Tabelle 10.1 dargestellt.

Tabelle 10.1

Antworten und deren Häufigkeiten zur Aufgabe 4 der Würfelvorstellung

Lücke/Ankreuzaufgabe	Antwort	f_{E3}	f_{E2}
1) $V = 2 \text{ cm}^3$ und $m = 18 \text{ g}$ bedeuten, dass 2 Kubikzentimeter(-Würfel) 18 g wiegen.	2	14 (58 %)	13 (72 %)
	1	4 (17 %)	4 (22 %)
	9 g	3 (13 %)	0 (0 %)
	keine	3 (13 %)	1 (6 %)
2) $V = 2 \text{ cm}^3$ und $m = 18 \text{ g}$, dass 2 Kubikzentimeter(-Würfel) 18 g wiegen .	wiegen	18 (75 %)	16 (89 %)
	dichte	0 (0 %)	1 (6 %)
	keine	6 (25 %)	1 (6 %)
3) Wenn man 18 g gleichmäßig auf 2 Kubikzentimeter(-Würfel) verteilt, bekommt jeder Würfel 9 g ab.	9	24 (100 %)	15 (83 %)
	keine	0 (0 %)	3 (17 %)
4) Die Dichte von Nickel beträgt somit $9 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$.	9	24 (100 %)	12 (67 %)
	4,5	0 (0 %)	2 (11 %)
	keine	0 (0 %)	4 (22 %)

Lücke/Ankreuzaufgabe	Antwort	f_{E3}	f_{E2}
5) Dafür musste ich 18 g : 2 cm³ rechnen.	18 g : 2 cm ³	18 (75 %)	16 (89 %)
	2 cm ³ : 18 g	5 (21 %)	0 (0 %)
	keine	1 (4 %)	2 (11 %)
6) Die Formel der Dichte lautet: $\rho = \frac{m}{V}$.	$\rho = \frac{m}{V}$	13 (54 %)	10 (56 %)
	$\rho = \frac{V}{m}$	10 (42 %)	5 (24 %)
	keine	1 (4 %)	3 (14 %)

Anmerkung. Die Musterlösung der jeweiligen Lücken bzw. Ankreuzaufgaben ist fett gedruckt.

Es fällt auf, dass fast der Hälfte der Lernenden die Übersetzung von „ $V = 2 \text{ cm}^3$ “ in „2 Kubikzentimeter(-Würfel)“ (1) nicht gelang und einige stattdessen mit „1“ oder „9 g“ antworteten. Auffallend ist auch, dass allen Lernenden die vorstellungsorientierte Division (3) sowie die Übersetzung der Masse des Kubikzentimeters (-würfels) in die Dichte (4) gelang, während dies beim Ankreuzen der entsprechenden Rechnung (5) und der Dichteformel (6) nicht der Fall war. Stattdessen vertauschten einige Lernende Dividend und Divisor. Bei der Dichteformel waren es jedoch doppelt so viele wie bei der Rechnung.

Der Merktzettel in der Sicherungsphase wurde von allen weitgehend richtig ausgefüllt. Punktabzug gab es im ersten Teil (Formel) bei sechs Lernenden wegen fehlender Antworten bei der Übersetzung von „Volumen“ in das Symbol „ V “ (siehe Abbildung 10.5) sowie bei zwei Lernenden, die angaben, dass zur Bestimmung der Dichte „Gramm“ oder das „Volumen“ durch die Anzahl der Kubikzentimeterwürfel dividiert werden muss. Im zweiten Teil (Übersetzen) kam es zu Punktverlust, insbesondere durch fehlende Antworten bei der Eintragung der Masse auf der Anzeige der Waage (siehe Abbildung 10.5). Dies war bei 14 Lernenden der Fall. Außerdem übersetzten vier Lernende die Angabe „cm³“ mit „cm³“ oder mit „Volumen“ anstatt mit „Kubikzentimeter“ oder „Kubikzentimeter(-Würfel)“. Die restlichen Lücken wurden von allen Lernenden bis auf zwei vollständig richtig ausgefüllt.

Abbildung 10.5

Lösung von S19_E3 des Merkzettels der Würfelvorstellung als Beispiel für die am häufigsten freigelassenen Lücken

Bestimmung und Formel der Dichte!

Um die Dichte zu bestimmen, muss man die masse eines Stoffes durch die Anzahl der cm³ (-Würfel) teilen. Deshalb gilt:

Dichte = $\frac{\text{masse}}{\text{Volumen}}$ $\leftrightarrow$ $\rho = \frac{m}{V}$

Schwer ist nicht gleich dicht!

So schreibt und liest man die Dichte!

Wir schreiben: $\rho(\text{Wasser}) = 1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ pro von Wasser cm³ (-Würfel)

Wir sagen: Die Dichte von Wasser beträgt 1 Gramm pro cm³ (-Würfel).

Wir beobachten: Ein Kubikzentimeter(-Würfel) Wasser wiegt 1 Gramm.

Die Berechnung der Dichte (5a) in der Vertiefungsphase wurde in den Teilaufgaben (ii)-(iv) von mehr als 80 % der Lernenden zu mindestens 50 % korrekt durchgeführt. Ein Großteil der fehlenden Punkte ist auf den letzten Schritt der Berechnung zurückzuführen, in welchem das Endergebnis der Dichte in „ $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ “ angegeben werden sollte. Dies wird besonders deutlich durch die geringere Lösungshäufigkeit der ersten Teilaufgabe (i), die lediglich aus diesem Schritt bestand. Häufig wurde in dem letzten Schritt entweder keine Antwort oder die Antwort „ ρ “ angegeben (siehe Abbildung 10.6). Zu weiteren Punktverlusten kam es überwiegend durch fehlende Einheiten.

Die Zusammenhänge zwischen der Dichte und dem Volumen sowie der Dichte und der Masse (7a) konnte von der Mehrheit der Lernenden nicht oder nur ansatzweise hergestellt werden (siehe Abbildung 10.7). Am häufigsten wurde bei den einzelnen Lücken keine Antwort gegeben. Die richtige und die falschen Antwortmöglichkeiten wurden bei den meisten Lücken ähnlich häufig gewählt. Eine leichte Tendenz zur richtigen Antwort lässt sich bei den ersten beiden Lücken zum Zusammenhang zwischen Dichte und Masse erkennen.

Die Aufgabe zum Vergleichen der Dichte von Objekten (7b) haben hingegen drei Viertel der Lernenden zu mindestens 50 % richtig bearbeitet (siehe Abbildung 10.8). Zu Punktverlust kam es aufgrund von fehlenden oder unvollständigen Antworten. Eine vergleichsweise *höhere* Dichte erkannten 20 Lernende bei einem

Abbildung 10.6

Lösung von S5_E3 zur Aufgabe 5a der Würfelvorstellung als Beispiel für einen häufigen Fehler im letzten Berechnungsschritt

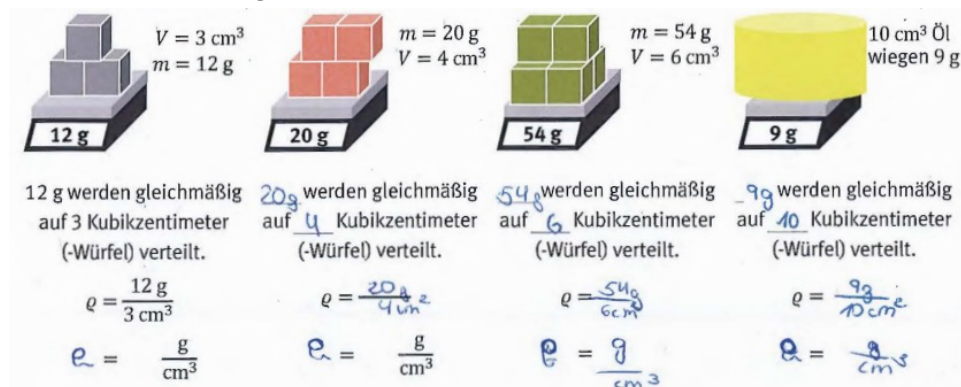


Abbildung 10.7

Fehlerhafte Lösung von S20_E3 zur Aufgabe 7a der Würfelvorstellung

Zusammenhang zwischen Dichte und Volumen

Vergrößert man nur das Volumen, muss die gleiche Masse auf mehr | weniger | gleich viele Kubikzentimeter (-Würfel) verteilt werden. Deshalb bekommt jeder Kubikzentimeter (-Würfel) mehr | weniger | gleich viel Masse ab. Die Dichte nimmt zu | nimmt ab | bleibt gleich.

Zusammenhang zwischen Dichte und Masse

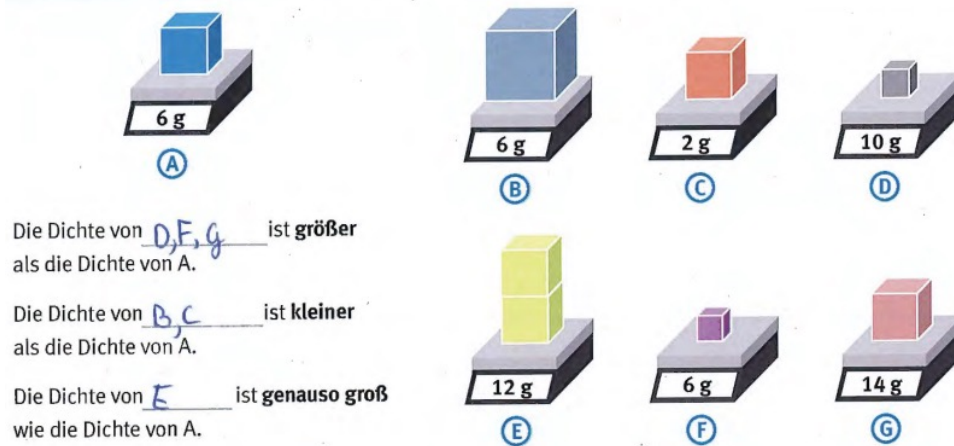
Vergrößert man nur die Masse, muss mehr Masse auf mehr | weniger | gleich viele Kubikzentimeter (-Würfel) verteilt werden. Deshalb bekommt jeder Kubikzentimeter (-Würfel) mehr | weniger | gleich viel Masse ab. Die Dichte nimmt zu | nimmt ab | bleibt gleich.

kleineren, schwereren Objekt (D), 15 bei einem kleineren, gleichschweren Objekt (F) und 10 bei einem gleichgroßen, schwereren Objekt (G). Eine vergleichsweise *geringere* Dichte erkannten 18 bei einem größeren, gleichschweren Objekt (B) und nur 11 bei einem gleichgroßen, leichteren Objekt (C). Insgesamt wird dadurch die höhere Lösungshäufigkeit bei der Veränderung des Volumens im Vergleich zur Veränderung der Masse ersichtlich. Die gleichbleibende Dichte bei einer Verdopplung des Volumens und der Masse (E) erkannten 18 Lernende.

Eine Begründung für die Stoffmengeninvarianz der Dichte anhand einer Darstellung, die herausgeschnittene Kubikzentimeterwürfel aus verschiedenen großen Gummiwürfeln zeigt (6b), konnten ungefähr drei Viertel der Lernenden nicht angeben. Nahezu alle von ihnen gaben keine Antwort an. Eine Person gab mit „Weil egal der Klumpen vorher ist bleibt die Dichte gleich“ (S14_E3_Art) eine Antwort, die aufgrund der nicht erkennbaren Begründung keine Punkte gab.

Abbildung 10.8

Korrekte Lösung von S7_E3 zur Aufgabe 7b der Würfelvorstellung



Vergleich zu E2 Bei der Betrachtung der Punkteverteilung der Aufgaben zur Würfelvorstellung in E2 (siehe Abbildung 10.9) lassen sich nahezu identische Tendenzen zu E3 erkennen.

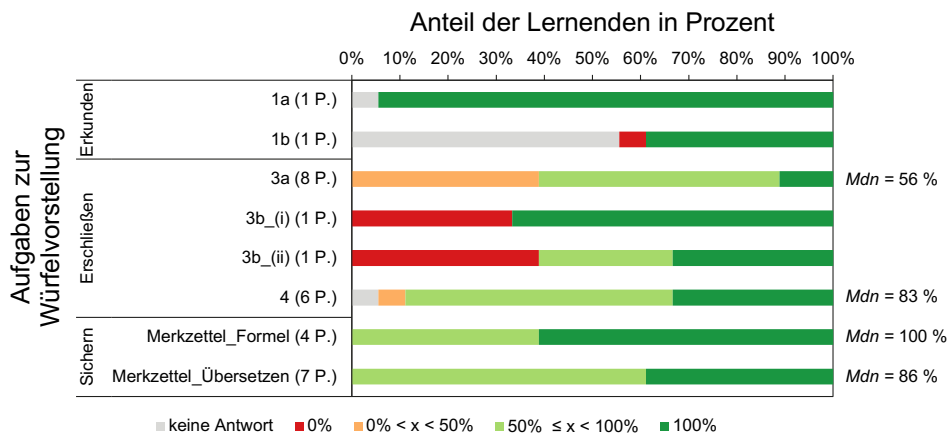
So wurde (a) von allen Lernenden der Merkzettel weitestgehend richtig ausgefüllt, (b) von nahezu allen Lernenden das Lakritzbonbon als die aus dem schwersten Stoff bestehende Süßigkeit identifiziert (1a) und (c) von dem Großteil der Lernenden der Lückentext zur Bestimmung der Dichte (4) zu mindestens 50 % richtig bearbeitet. Bei Letzterem zeigten sich zudem ähnliche Tendenzen in den Antworten, wie in Tabelle 10.1 ersichtlich ist. Im Gegensatz zu E3 gab es jedoch auch einige Lernende, denen die Berechnung der Dichte sowie die Übersetzung der Masse eines Kubikzentimeterwürfels in die Dichte nicht gelang. Zudem fällt auf, dass im Gegensatz zu E3 niemand die Rechnung mit vertauschtem Divisor und Dividend ankreuzte.

Hinsichtlich des Merkzettels zeigte sich auch bei E2, dass es fast ausschließlich zu Punktabzug aufgrund fehlender Übersetzungen von „Volumen“ in das Symbol „V“ ($f = 4$) sowie fehlende Antworten bei der Eintragung der Masse auf der Anzeige der Waage ($f = 10$) kam.

Weiterhin erreichte analog zu E3 ein relativ hoher Anteil der Lernenden bei der Bestimmung des „schwersten“ Stoffes anhand von Würfeldarstellungen (1b) sowie bei der Unterscheidung zwischen „dicht“ und „schwer“ (3b) nicht die volle Punktzahl. Auch hier erreichten in der Aufgabe 3b bei der Begründung der höheren Dichte

Abbildung 10.9

Verteilung der erreichten Punkte in Prozent der maximalen Punktzahl bei den Aufgaben zur Würfelvorstellung (E2)



Anmerkung. Prozentangaben in der Legende beziehen sich auf den Anteil der erreichten Punkte im Verhältnis zur Maximalpunktzahl der jeweiligen (Teil-)Aufgabe. Die Maximalpunktzahl ist in Klammern angegeben. Für Aufgaben mit mehr als vier möglichen Punkten ist zur besseren Interpretierbarkeit zusätzlich der Median der erreichten Prozentpunkte (inklusive fehlender Antworten) angegeben.

te von Gold (ii) einige Lernende zumindest 0,5 Punkte, da sie erkannten, dass das gleiche Volumen betrachtet werden muss, jedoch fehlte der Bezug zur Masse.

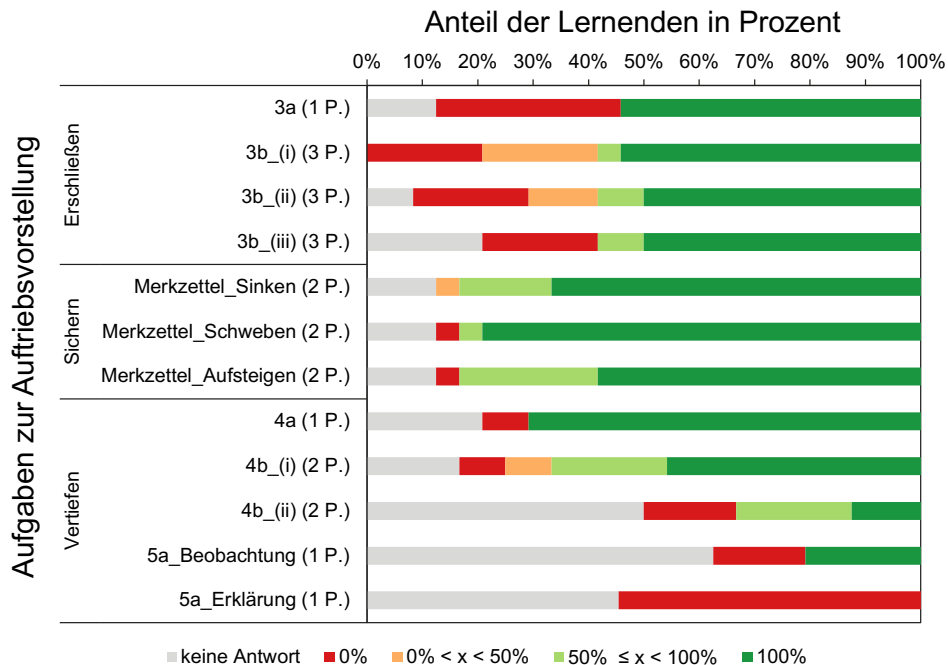
Lediglich das Ausfüllen der Lücken zum Erklärvideo (3a) fiel im Vergleich zu E3 deutlich schlechter aus, da bei E2 etwa 40 % der Lernenden weniger als die Hälfte der Punkte erreichten und bei E3 niemand. Allerdings zeigte sich auch hier, dass die fehlenden Punkte insbesondere darauf zurückzuführen sind, dass mit jeweils 15 Lernenden die Lücken zur Beschreibung der Dichte als Stoffeigenschaft sowie die Beschriftung des griechischen Buchstabens „ ρ “ mit der Dichte häufig offen gelassen wurden. Im Gegensatz zu E3 wurden jedoch auch zusätzlich mit 12 Lernenden die Beschreibung der Dichte als „Masse eines Kubikzentimeter(-Würfels)“ sowie mit jeweils acht Lernenden die Beschriftung der Symbole „g“ und „cm³“ häufig offen gelassen.

Auftriebsvorstellung Die Punkteverteilung der Aufgaben zur Auftriebsvorstellung sind in der Abbildung 10.10 dargestellt.

Insgesamt ist festzustellen, dass bei 9 von 12 (Teil-)Aufgaben etwa die Hälfte der

Abbildung 10.10

Verteilung der erreichten Punkte in Prozent der maximalen Punktzahl bei den Aufgaben zur Auftriebsvorstellung (E3)



Anmerkung. Prozentangaben in der Legende beziehen sich auf den Anteil der erreichten Punkte im Verhältnis zur maximalen Punktzahl der Aufgabe. Die maximal erreichbare Punktzahl ist bei jeder (Teil-)Aufgabe in Klammern notiert.

Lernenden oder mehr die volle Punktzahl erreicht hat. Zudem wurden bis auf die Teilaufgabe „5a_Erklärung“ bei den verbleibenden Aufgaben von mindestens drei Lernenden die volle Punktzahl erreicht. Im Folgenden werden die einzelnen Aufgaben im Detail betrachtet.

In der Erschließungsphase erkannte etwas mehr als die Hälfte der Lernenden mithilfe der Simulation, dass ausschließlich die Dichte verändert werden muss, um Stoffe aufsteigen, schweben oder sinken zu lassen (3a). Sieben weitere Lernende wählten ebenfalls „Dichte“, jedoch zusätzlich eine weitere Eigenschaft (zwei: „Form“; fünf: „Masse“). Eine Person wählte ausschließlich „Form“.

Auch die Regeln in 3b konnten von etwa der Hälfte der Lernenden korrekt formuliert werden. Die Punkteverteilung pro Regel (i–iii) ist dabei nahezu identisch.

Um typische Fehler bei den Lernenden ohne volle Punktzahl bei Aufgabe 3b ($n = 13$) identifizieren zu können, wurden in Tabelle A.2.1 die Antwortmuster für die Aufga-

ben 3a und 3b zusammengefasst. Bis auf eine Person, die überall „Dichte“ angab, stimmten bei allen Lernenden die bei Aufgabe 3a angekreuzten Stoffeigenschaften nicht oder nur zum Teil mit den Eigenschaften bei Aufgabe 3b überein (siehe Abbildung 10.11).

Abbildung 10.11

Falsche Lösung von S23_E3 zur Aufgabe 3 der Auftriebsvorstellung

Man muss ☐ die Masse (m) ☐ das Volumen (V) ☐ die Dichte (ρ) ☒ die Form verändern.

grauer Würfel

Zustand: gasförmig $m = 0,0036 \text{ g}$

$V = 20 \text{ cm}^3$

Stoff: Helium $\rho = 0,0002 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$



blauer Stoff/Gegenstand

$m = 2 \text{ g}$ Zustand: fest ☐

$V = 1 \text{ cm}^3$ Form: Würfel ☐

$\rho = 2 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$

b) Formuliere mithilfe der Simulation Regeln für das Aufsteigen, Schweben und Sinken, indem du die Lücken vervollständigst.

Ist die dichte von dem blauen Gegenstand oder Stoff dichter als die masse von dem grauen Würfel, **steigt** der blaue Gegenstand oder Stoff **auf**.

Ist die dichte von dem blauen Gegenstand oder Stoff dichter wie die von dem grauen Würfel, **schwebt** der blaue Gegenstand oder Stoff.

Ist die _____ von dem blauen Gegenstand oder Stoff _____ als die von dem grauen Würfel, **sinkt** der Gegenstand oder Stoff.

Vier weitere Lernende (S1, S2, S25 und S26) zeigten ein ähnliches Antwortmuster wie in Abbildung 10.11. Auch bei ihnen wurde jedoch jeweils „Dichte“ und „Masse“ als Eigenschaften sowie eine falsche Tendenz („dichter“) angegeben. Unterschiede bestanden lediglich in der Auswahl bei 3a oder der Anzahl fehlender Antworten in 3b_(ii).

Fünf Lernende (S15, S16, S17, S21 und S22) kreuzten bei Aufgabe 3a „Dichte“ und „Masse“ an. Bei der Formulierung der Regeln beantworteten sie bei jeder Regel nahezu ausschließlich die erste Lücke und gaben dort „Form“ als Lösung an.

Zwei Lernende formulierten die Regeln vollständig korrekt bis auf eine falsche Tendenz bei der Regel zum Schweben (S12) bzw. zum Sinken (S19).

Den Merktzettel bearbeiteten etwa 80 % der Lernenden weitestgehend korrekt. Zu Punktabzug kam es hier ebenfalls aufgrund von fehlenden Antworten. Zudem ga-

ben einige wenige Lernende entweder die falsche Tendenz an oder die richtige Tendenz, jedoch falsch formuliert. Beispielsweise gab eine Person an, dass ein Stoff oder Gegenstand aufsteigt, wenn seine Dichte „leichter“ ist.

In der Vertiefungsphase konnten etwas mehr als 70 % der Lernenden anhand der Dichte von Stoffen erkennen, welcher Stoff in Wasser schwimmt (4a). Fünf Lernende bearbeiteten die Aufgabe nicht. Zwei Lernende bearbeiteten die Aufgabe falsch, da sie entweder sinkende Stoffe umkreist oder schwimmende Stoffe nicht umkreist haben.

Die Schichten, in denen jeweils zwei Gegenstände schwimmen, wenn sie in einen Dichteturm gegeben werden (4b_(i)), konnten ebenfalls etwa 70 % der Lernenden teilweise korrekt vorhersagen. Punktabzug gab es, da einige Lernende zwei Schichten angaben, zwischen denen sich der Gegenstand befinden soll. Eine falsche Schicht wurde nur vereinzelt angegeben.

Die Identifikation der Kunststoffe von zwei Kugeln innerhalb des Dichteturms (ii) gelang etwa zwei Dritteln der Lernenden nicht. Der Großteil der Lernenden gab keine Antwort an. Die anderen Lernenden gaben entweder einen falschen Stoff an oder eine Schicht aus dem Dichteturm.

Eine angemessene Beobachtung zum Seifenblasenexperiment (5a) konnten ca. 80 % der Lernenden nicht formulieren. 15 Lernende formulierten gar keine Beobachtung, während drei Lernende entweder nicht die wesentliche Beobachtung (Seifenblasen schweben über der Kohlenstoffdioxid-Schicht) oder bereits eine Deutung formulierten. Beispielsweise notierten zwei Lernende: „Die Dichte ist immer anders“ (S12_E3_Art).

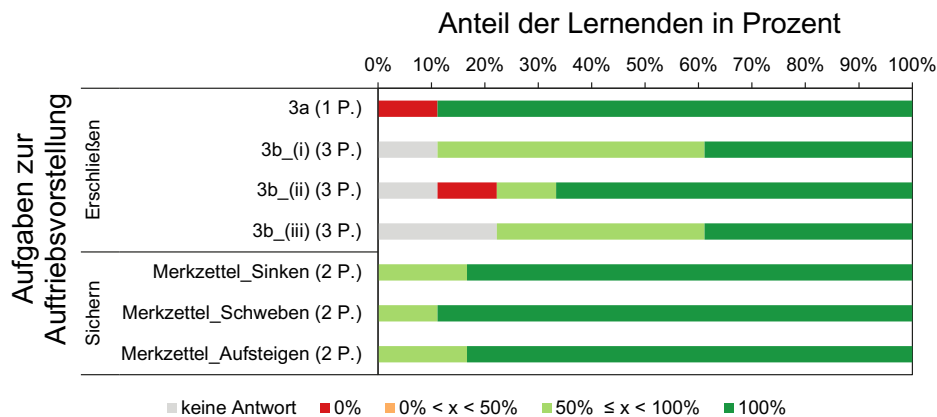
Eine angemessene Erklärung zum Seifenblasenexperiment (5a) konnte niemand formulieren. 20 Lernende formulierten gar keine Erklärung, drei Lernende notierten „weil sie nicht gleich sein kann“ (z. B. S14_E3_Art) und eine Person erklärte, dass beide Stoffe die gleiche Dichte hätten (S20_E3_Art).

Vergleich zu E2 Bei der Betrachtung der Punkteverteilung der Aufgaben zur Auftriebsvorstellung in E2 (siehe Abbildung 10.12) zeigen sich ähnliche, jedoch deutlich bessere Tendenzen im Vergleich zu E3.

Im Gegensatz zu E3 wird bei E2 jedoch eine unterschiedliche Punkteverteilung bei der Formulierung der drei Regeln (3b) ersichtlich. So ist der Anteil der Lernenden, die die volle Punktzahl erreichten, im Vergleich zu denen, die nur die Hälfte der

Abbildung 10.12

Verteilung der erreichten Punkte in Prozent der maximalen Punktzahl bei den Aufgaben zur Auftriebsvorstellung (E2)



Anmerkung. Prozentangaben in der Legende beziehen sich auf den Anteil der erreichten Punkte im Verhältnis zur maximalen Punktzahl der Aufgabe. Die maximal erreichbare Punktzahl ist bei jeder (Teil-)Aufgabe in Klammern notiert.

Punkte oder mehr erreichten, bei der Regel zum Schweben (ii) deutlich größer als bei den Regeln zum Aufsteigen und Sinken (i & ii).

Bei der genaueren Betrachtung der Antwortmuster (siehe Tabelle A.2.2) der Lernenden ohne volle Punktzahl bei Aufgabe 3b ($n=13$) zeigte sich, dass der Punktverlust insbesondere darauf zurückzuführen ist, dass die Lernenden mit „leichter“ für das Aufsteigen und „schwerer“ für das Sinken antworteten. Die Lernenden erkannten somit die korrekten Tendenzen, formulierten sie jedoch mit Adjektiven für den Massenvergleich. Im Gegensatz zu E3 stimmten zudem bei dem Großteil der Lernenden (9 von 13) die in 3a gewählte Eigenschaft mit den Lücken in 3b überein.

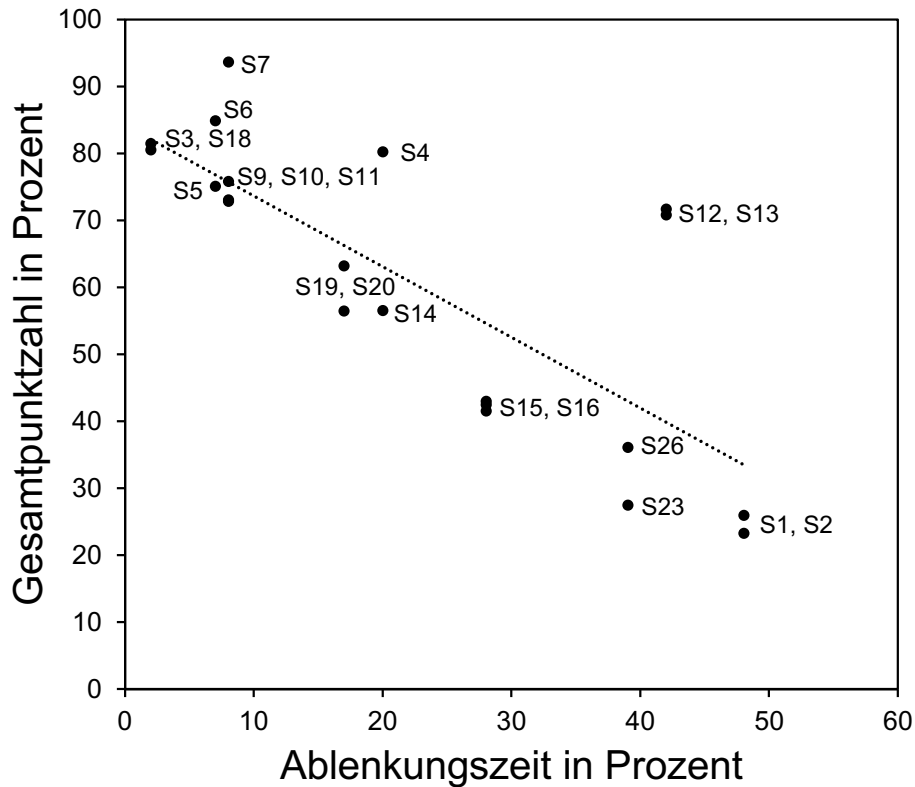
Ablenkungen Der Zusammenhang zwischen der Ablenkungszeit und der individuellen Gesamtpunktzahl der Lernenden ist in Abbildung 10.13 dargestellt.

Es zeigt sich ein deutlicher negativer Zusammenhang (Spearman $\rho = -0.82$, $p < .001$). So sinkt mit zunehmender Ablenkungszeit die erreichte Gesamtpunktzahl tendenziell.

Die Spannweite der Gesamtpunktzahlen reicht von 23 % bis 94 %, während die Ablenkungszeit zwischen 2 % und 48 % variiert. Besonders auffällig sind S12 und S13, die trotz hoher Ablenkung eine vergleichsweise hohe Gesamtpunktzahl erreichten.

Abbildung 10.13

Zusammenhang zwischen der Ablenkungszeit und der individuellen Gesamtpunktzahlen der Lernenden



Anmerkung. Die Gesamtpunktzahl in Prozent entspricht dem arithmetischen Mittel aus den erreichten Gesamtpunktzahlen der beiden Grundvorstellungen. Dabei wurden Unteraufgaben (z B. [i] bis [iv] bei Aufgabe 5a der Würfelvorstellung) innerhalb einer Aufgabe gemittelt, um Verzerrungen zu vermeiden. Die Ablenkungszeit in Prozent entspricht dem Anteil der codierten Ablenkungen an der Gesamtinterventionsdauer von 132 Minuten.

Ebenfalls auffällig sind S4 und S14, da hier bei gleicher Ablenkungszeit innerhalb der Gruppe deutlich unterschiedliche Gesamtpunktzahlen erreicht wurden.

Vergleich zu E2 Bei E2 wurden keine Ablenkungen codiert, da dort keine besonders stark abgelenkten Gruppen wahrgenommen wurden. Dementsprechend ist an dieser Stelle kein Vergleich zwischen E2 und E3 möglich.

Fragen und Antworten zu den Situationen auf dem Jahrmarktbild (F3.1.2)

In Abbildung 10.14 sind die Schülerfragen zu den Situationen auf dem Jahrmarktbild dargestellt.

Abbildung 10.14

Fragen zu den Situationen auf dem Jahrmarktbild



Anmerkung. Die Abbildung ist ein aufgenommener Screenshot der mittels Flinga gesammelten Fragen der Lernenden zum Zeitpunkt nach der Beantwortung der Fragen im Plenum.

Es ist zu erkennen, dass zu jeder Sprechblase eine Warum-Frage formuliert wurde, die direkt auf den Inhalt der Sprechblase bezogen ist. So wurde beispielsweise zu der Sprechblase „Huch, da gehen ja Enten unter“ die Frage „Warum gehen die Enten unter?“ formuliert. Es wurden jedoch auch jeweils weiterführende Fragen, wie beispielsweise „Aus welchem Stoff sind die Enten?“, zu den Situationen formuliert. Weiterhin ist zu erkennen, dass die Lernenden zusätzlich zu verschiedenen Situationen *ohne* Sprechblasen Fragen formulierten (siehe Süßigkeitenstand), obwohl dies nicht der Arbeitsauftrag war.

Vergleich zu E2 Das Formulieren von entsprechenden Warum-Fragen zur jeder Sprechblase und Fragen zu Situationen ohne Sprechblasen zeigte sich auch bei E2 (siehe Anhang A.3). Weiterführende Fragen zum Stoff der Objekte wurden hingegen nicht angegeben.

Beantwortung der Fragen der Würfelvorstellung im Plenum Zu Beginn der Plenumsphase – nach der Erarbeitung der Würfelvorstellung – bat die Lehrkraft zunächst um die Beantwortung der Frage „Was stimmt nicht?“. S6 schilderte zunächst die Situation am Luftballonstand und sprach dann davon, dass es komisch sei, dass das Kind „einen größeren Stein besser tragen kann“. S7 ergänzte: „Also das Kind trägt so einen riesigen Stein ganz leicht und der erwachsene Mann trägt einen kleineren. Und der, ich glaube, das ist ein Bodybuilder, auf jeden Fall hat der sehr viele Muskeln, und der kann nur so ein kleines und hat dabei schon Probleme.“ Die Frage nach einer Erklärung für dieses Phänomen beantwortete S3 mit der Dichte: „Die Dichte des Steins des Kindes ist geringer als die Dichte des Steins des Erwachsenen.“

Die Lehrkraft bat daraufhin um eine etwas genauere Erklärung mit Hilfe der zuvor erarbeiteten Würfelvorstellung der Dichte und zeichnete dazu kleine Quadrate als Modell für kleine Kubikzentimeterwürfel in die Objekte (siehe Abbildung 10.14). S7 wiederholte daraufhin die Aussage von S3 mit eigenen Worten und sagte, dass der Stoff des Mannes dichter sei als der des Kindes. Auf die Frage der Lehrkraft, was dies für die Würfel bedeute, ergänzte S7: „Also da – pro Würfel ist das schwerer“. Die Lehrkraft fragte weiter, welcher der aus den beiden Stoffen ausgeschnittenen Würfel des Mannes und des Kindes leichter bzw. schwerer sei. S7 antwortete: „Die Kugel ist schwerer. Also der Würfel aus der Kugel. Und der Würfel aus dem Stein ist leichter.“

Die Frage, aus welchem Stoff die Steine bestehen, wurde nicht beantwortet.

Vergleich zu E2 Die Beantwortung der Fragen zur Würfelvorstellung im Plenum verlief ähnlich zu E3. So wurde ebenfalls zunächst die Frage „Was stimmt nicht?“ beantwortet und daraufhin von S16 und S2 die Problematik des Stärkewettbewerbs beschrieben. Auf die Frage nach einer Erklärung für die Problematik gab S12 hingegen Styropor, statt die Dichte an, da dieses „leichter wie der Stein“ sei. Daraufhin zeichnete die Lehrkraft ebenfalls kleine Quadrate als Modell für die Kubikzentime-

terwürfel in die Objekte und bat die Lernenden die Problematik mithilfe der Würfelvorstellung der Dichte zu erklären. Daraufhin erklärte S23: „Weil in dem größeren Stein vielleicht die Dichte nicht so dicht, also die Masse nicht so dicht ist, wie bei dem grünen Gewicht.“ Auf die anschließende Aufforderung durch die Lehrkraft, die Problematik erneut anhand der Würfel und der Dichte zu erklären, antwortete S20: „... dieses Gewicht, das der Mann hebt, das hat eine größere Dichte als das von diesem Stein. Das kann man auch eigentlich daran sehen, wenn man jetzt von jedem einen Kubikzentimeter nimmt und das dann wiegen würde, dann könnte man da ja auch sehen, was schwerer ist.“

Beantwortung der Fragen der Auftriebsvorstellung im Plenum Zu Beginn der Plenumsphase lenkte die Lehrkraft den Fokus auf die Frage „Warum gehen die Enten unter?“ und forderte die Lernenden auf, zunächst die Frage zu klären, warum Enten schwimmen können bzw. was man über die Dichte der schwimmenden Enten sagen kann. Dabei verwies sie auf die zuvor erarbeiteten Inhalte. S6 erklärte zunächst, dass die Dichte der Enten *höher* sei als die Dichte des umliegenden Stoffes, korrigierte dies aber nach der Aufforderung zur Wiederholung seiner Antwort, dass die Dichte *geringer* sei. Auf die Nachfrage der Lehrkraft, was der umliegende Stoff sei, entgegnete S6: „Die Luft“. S18 erklärte: „Die Dichte der Enten ist gleich groß oder kleiner als die Dichte des Wassers.“ Auf die Nachfrage, was die anderen dazu meinen, antwortete S7 fragend: „Die Dichte der Enten ist geringer als die des Wassers?“ Die Lehrkraft bestätigte dies und fragte, was passieren würde, wenn die Dichte der Enten gleich der Dichte des Wassers wäre. S3 antwortete: „Die Enten würden unter Wasser schweben.“ Anschließend wurde die noch offene Frage behandelt, warum manche Enten untergehen. Dazu wollte die Lehrkraft erneut zunächst wissen, was über die Dichte der untergehenden Enten gesagt werden kann. S20 antwortete: „Die muss höher sein, als die des Wassers.“ S7 vermutete, dies könnte daran liegen, dass Wasser in die Enten eingedrungen ist. Die verbleibende Frage zu der Situation „Aus welchem Stoff bestehen die Enten?“ wurde nicht beantwortet. Stattdessen wurde zur Situation mit dem Ballonstand und der Frage „Warum fliegen die Ballons auf dem Jahrmarkt?“ übergeleitet, mit der Bitte, zunächst zu klären, welche Aussagen über die Dichte der Ballons getroffen werden können. S3 erklärte: „Die Dichte des Ballons ist geringer als die Dichte der Luft, weil da eben Helium drin ist.“ Bezüglich der Ballons zu Hause, die nicht fliegen, bemerkte eine Person: „Die

Dichte des Ballons, die nicht fliegen, ist höher als die Dichte von der umliegenden Luft.“ S20 stellte fest, dass vermutlich kein Helium in diesen Ballons sei, sondern Luft, wie S23 ergänzte. Die Lehrkraft wies auf den Widerspruch hin, dass der Ballon doch schweben müsse, wenn innen und außen Luft ist und somit die gleiche Dichte vorliegt. S20 verglich den Ballon mit einem Ball und erklärte, dass „die Außenhülle ... ja auch noch ein bisschen Gewicht“ wodurch „die ... ein bisschen schwerer ist als die Luft außenrum.“ Die Lehrkraft formulierte daraufhin eine ähnliche Erklärung mithilfe der Dichte.

Vergleich zu E2 Die Beantwortung der Fragen zur Auftriebsvorstellung im Plenum verlief ebenfalls ähnlich zu E3. So wurde auch bei E2 versucht, die Frage „Warum gehen die Enten unter?“ zu beantworten, indem zunächst die Frage geklärt wurde, was über die Dichte der schwimmenden und sinkenden Enten gesagt werden kann. S18 erklärte zunächst, dass „die Dichte genauso viel wie das Wasser“ betrage, korrigierte sich aber selbst und gab die korrekte Antwort an. Hinsichtlich der untergehenden Enten erklärte S9: „Die Dichte ist größer als die vom Wasser.“ Als möglicher Grund für das Untergehen wurde von S20 analog zu E3 das Eindringen von Wasser genannt. Zusätzlich wurde von S7 angeführt, dass die Enten möglicherweise mit „zu viel Gummi ... oder irgendwas anderem“ gefüllt seien.

Hinsichtlich der Situation mit dem Ballonstand wurde ebenfalls zunächst die Frage nach der Dichte der aufsteigenden Ballons geklärt. Nach dem Einwurf von S16, dass Helium in den Ballons sei, antwortete S2: „Weil die Dichte von Helium leichter als Wasser ist?“ S9 korrigierte dies zu: „Weil die Dichte von Helium leichter als die Dichte von Luft ist?“. Auf den Hinweis der Lehrkraft, dass die Antwort sprachlich ungenau sei, korrigierte S23: „Weil die Dichte von Helium niedriger ist als von Luft?“ Bezüglich der Frage nach der Dichte der sinkenden Ballons bemerkte S20 zunächst, dass in den Ballons Luft sei. S18 erklärte daraufhin: „Also, weil, ich schätze mal, dass der die ganz normal aufgepustet hat, also mit normaler Luft. Genau, und weil das ja gleich schwer ist und dann ist der Ballon, das Gewicht von dem Ballon, ist ja auch noch dabei, dann ist das insgesamt halt schwerer als, äh nein, dann ist die Dichte höher als die Luft glaube ich.“

Lösungsstrategien zur Bestimmung des „schwereren“ Stoffes (F3.1.3)

Wie bereits in Abschnitt 10.2.1 dargelegt, wurden hinsichtlich der Lösungsstrategien alle vier Erprobungen berücksichtigt. Aus diesem Grund werden im Folgenden die Ergebnisse von E3 nicht vergleichend zu E2, sondern vergleichend zu den restlichen Erprobungen (E0-E2) präsentiert. In Tabelle 10.2 sind dazu die Codes und deren Häufigkeiten zu der Art der Strategien dargestellt, welche die Lernenden zur Begründung des schwersten Stoffes (1b) verwendeten.

Tabelle 10.2

Übersicht über die Codes und deren Häufigkeiten zur Codierung der Art der Strategien

Hauptcode (Subcodes)	Beispiel	f_{E3}	f_{Rest}^a
Auf das gleiche Volumen bringen (unspezifisch, bestimmter Stoff, 1 cm³ / 1 Würfel)	„Nickel ist am schwersten, da 1 cm ³ am meisten wiegt“ (S12_E3_Art).	8 (47 %)	25 (46 %)
Betrachtung von Volumen und Masse (mit oder ohne Vergleich zu anderen Stoffen)	„Weil von Nickel nur 2 Würfel drauf liegen aber trotzdem fast so viel Masse wie Glas hat“ (S20_E1_Art).	6 (35 %)	14 (26 %)
Volumen/Masse am größten	„Kohlenstoff ist der schwerste Stoff, da das Volumen geteilt durch die Masse am meisten ergibt“ (S5_E0_Art).	0	2 (4 %)
Absolute Masse	„Glas ist der schwerste Stoff, weil es mehrere Würfel enthält, welches ihn am schwersten macht“ (S13_E0_Art).	0	4 (7 %)

Hauptcode (Subcodes)	Beispiel	f_{E3}	f_{Rest}^a
nicht nachvollziehbar	„Nickel ist am schwersten, da die anderen Stoffe viel größer sind und trotzdem fast gleich groß sind“ (S13_E0_Art).	0	4 (7 %)
keine ^b		3 (18 %)	5 (9 %)

Anmerkungen. Fettgedruckte Subcodes entsprechen den Kodierungen im jeweiligen Beispiel.

^a E0, E1, und E2.

^b Dieser Code umfasst nicht die Lernenden, die keine Antwort gegeben haben, sondern diejenigen, die eine Antwort ohne Begründung gegeben haben.

Es lässt sich erkennen, dass die Häufigkeiten der Strategien bei E3 und den restlichen Erprobungen ähnlich verteilt sind. So wurden bei etwas weniger als der Hälfte der Strategien die Stoffe auf das gleiche Volumen gebracht und bei annähernd einem Drittel (E3) bzw. einem Viertel (E0-E2) der Strategien die Masse im Verhältnis zum Volumen betrachtet. Zudem gab jeweils nur ein geringer Teil der Lernenden keine Begründung an.

Während bei E3 keine weiteren Strategien identifiziert werden konnten, zeigten sich bei den restlichen Erprobungen noch weitere Strategien. Einige Lernende berechneten das Verhältnis von Volumen zu Masse und andere betrachteten lediglich die absolute Masse statt die Masse im Verhältnis zum Volumen. Diese Lernenden gelangten nicht zur richtigen Lösung, dass Nickel der „schwerste“ Stoff ist.

Hinsichtlich der Strategien *Auf das gleiche Volumen bringen* und *Betrachtung von Volumen und Masse* konnten zudem verschiedene Subcodes identifiziert werden (siehe Anhang C.2), welche die Strategien weiter ausdifferenzieren. So konnte das Volumen unspezifisch sein (z. B. „Der Stoff Nickel ist am schwersten, da er pro Volumen am meisten wiegt“, S19_E3_Art.), einem der drei Stoffe entsprechen (z. B. „Nickel ist das schwerste, da wenn man daraus 10 Blöcke macht (wie beim Glas) ist es 90 gramm“, S14_E1_Art.) oder wie in dem Beispiel 1 cm³ betragen. Die Betrachtung von dem Volumen und der Masse konnte entweder *ohne* (z. B. „Nickel, weil 2 Würfel schon 18 g wiegen.“, S25_E3_Art.) oder wie in dem Beispiel *mit* Vergleich zu den anderen Stoffen sein.

Auch innerhalb dieser Kategorien konnte eine Diversität in den Antworten der Lernenden festgestellt werden. Beispielsweise gaben einige Lernende in der Kategorie $1 \text{ cm}^3 / 1 \text{ Würfel}$ lediglich an, dass Nickel am schwersten ist, da 1 cm^3 am meisten wiegt. Andere Lernende hingegen gaben zusätzlich die konkrete Masse pro Kubikzentimeter von einem oder mehreren Stoffen an, teils mit, teils ohne Rechnung.

Eine Übersicht, inwiefern die Lernenden die Strategien mithilfe von Würfeln oder dem Volumen beschreiben, ist in Tabelle 10.3 dargestellt.

Tabelle 10.3

Übersicht über die Codes und deren Häufigkeiten zur Codierung der Beschreibung der Strategien mithilfe von Würfeln oder dem Volumen

Hauptcode	Beispiel	f_{E3}	f_{Rest}^a
Würfel	Nickel, da es mit nur 2 Würfeln schon schwerer ist als 8 von Kohlenstoff und Glas ist nur am schwersten, wie es so viele Würfel sind. (S18_E0_Art)	2 (14 %)	23 (47 %)
Volumen	Der Stoff Nickel ist am schwersten, da Nickel bei 2 cm^3 schon 18 g wiegt und Glas erst bei 10 cm^3 25 wiegt. (S9_E0_Art)	12 (86 %)	24 (49 %)
uneindeutig	Kohlenstoff schwerster Stoff weil darin ist viel mehr Masse in Kohlenst. (S18_E1_Art)	0	2 (4 %)

^a E0, E1 und E2.

Es lässt sich feststellen, dass bei E3 nahezu alle Strategien mithilfe des Volumens oder in Kubikzentimetern beschrieben wurden, während dies bei den übrigen Erprobungen nur auf annähernd die Hälfte der Strategien zutraf. Die andere Hälfte wurde mithilfe von Würfeln beschrieben.

Vermutungen und Begründungen der Lernenden zum Auftriebsverhalten der Schokoriegel (F3.1.4)

Die Vermutungen und Begründungen der Lernenden zur Frage, welcher der beiden Schokoriegel (Bounty und Milky Way) schwimmt (1a), sind in Tabelle 10.4 dargestellt.

Tabelle 10.4

Häufigkeiten der Vermutungen und Begründungen zur Aufgabe 1a der Auftriebsvorstellung

Vermutung	f_{E3}	f_{E2}	Begründung	f_{E3}	f_{E2}
Milky Way schwimmt	21	14	Bounty ist dichter	0	1
			leichter	11	10
			leichter und enthält Milch	2	0
			kleiner	2	0
			kleiner und leichter	4	1
			enthält Luft	2	2
Bounty schwimmt	1	2	schwerer	0	1
			größer	0	1
			enthält Luft	1	0
keine	2	2			

Daraus wird ersichtlich, dass nahezu alle Lernenden (88 %) korrekt vermuteten, dass der Milky Way-Riegel schwimmt. Der Großteil davon (90 %) begründet dies mit der geringeren Masse des Milky Way-Riegels. Im Vergleich dazu wird die geringere Größe deutlich weniger als Begründung genannt. Die enthaltene Luft wurde

von einigen wenigen Lernenden bei beiden Riegeln als Grund für die Schwimmfähigkeit angeführt.

Die Vermutungen und Begründungen der Lernenden zur Anschlussfrage, ob ein im Vergleich zum Milky Way-Riegel kleineres und leichteres Stück Bounty schwimmt oder nicht (1b), sind in Tabelle 10.5 dargestellt.

Tabelle 10.5

Häufigkeiten der Vermutungen und Begründungen zur Aufgabe 1b der Auftriebsvorstellung

Vermutung	f_{E3}	f_{E2}	Begründung	f_{E3}	f_{E2}
kleines Stück Bounty schwimmt nicht	14	12	größere Dichte	0	6
			Dichte bleibt gleich	4	1
			nicht so dicht	1	3
			schwerer als Wasser	2	0
			schwerer aufgrund von eindringendem Wasser	2	0
			schwerer	0	1
			zu schwer	1	1
			liegt an dem Stoff	2	0
			liegt an der Konsistenz	2	0
kleines Stück Bounty schwimmt	4	2	leichter	4	2

Vermutung	f_{E3}	f_{E2}	Begründung	f_{E3}	f_{E2}
uneindeutig	2	0	Dichte bleibt gleich	1	0
			nicht so dicht wie Milky Way	1	0
keine	4	4			

Hier wird deutlich, dass der überwiegende Teil der Lernenden (58 %) richtig vermutete, dass das kleinere und leichtere Stück Bounty nicht schwimmt. Zu jeweils etwa einem Drittel begründeten die Lernenden dies mit der Dichte, der Masse oder dem Stoff bzw. der Konsistenz des Stoffes. Die Dichte wurde auch von zwei Lernenden als Grund genannt, die keine eindeutige Vermutung äußerten. Insgesamt wurde die Dichte sowohl richtig (Dichte bleibt gleich) als auch falsch (Bounty ist nicht so dicht wie Milky Way) als Grund für das Schwimmverhalten der Riegel genannt.

Einige Lernende argumentierten, dass das Stück Bounty „schwerer als Wasser“, „zu schwer“ oder „schwerer durch das Eindringen von Wasser“ sei. Dagegen vermuteten vier Lernende, dass das kleine Stück Bounty schwimmt, weil es weniger Masse hat als vorher.

Vergleich zu E2 Hinsichtlich der Vermutungen und Begründungen zur Aufgabe 1a zeigte sich, dass bei E2 ebenfalls nahezu alle Lernenden (78 %) vermuteten, dass der Milky Way-Riegel schwimmt, und der Großteil der Lernenden (79 %) dies mit der geringeren Masse des Milky Way-Riegels begründeten (siehe Tabelle 10.4).

Weiterhin vermutete auch bei E2 der überwiegende Teil der Lernenden (67 %) korrekt, dass das kleinere und leichtere Stück Bounty nicht schwimmt. Der Anteil der Lernenden, der dies mit der Dichte begründete, ist mit etwa 83 % hingegen deutlich größer als bei E3.

Beantwortung der Reflexionsaufgaben im Plenum (F3.1.5)

Würfelvorstellung Zu Beginn der Plenumsphase forderte die Lehrkraft zunächst eine Beschreibung der in der Aufgabe (siehe Abbildung 9.8 in Abschnitt 9.2) dargestellten Problematik ein. S3 erklärte, dass Chloe denke, alles sei gleich viel Masse bzw. alles sei gleich viel Material. Aber wenn dem so wäre, dann wäre Gold schwerer. S7 ergänzte: „Also eigentlich ist das von Malia, weil man kann nur sagen, welcher Stoff verhältnismäßig schwerer ist, also wenn die das gleiche Volumen haben, weil wenn viel mehr Volumen an Eisen da ist und viel weniger an Gold, dann ist Eisen natürlich schwerer als Gold, aber wenn es das gleiche Volumen hat, dann ist Gold schwerer.“ Auf die Frage der Lehrkraft, welcher Stoff nun verhältnismäßig am schwersten sei, antwortete S4 mit „Gold“ und erklärte auf Nachfragen der Lehrkraft: „Weil ein Würfel Gold wiegt 20 Gramm und ein Würfel Eisen wiegt 8 Gramm ... Da kann man einfach die Würfel zählen. Und dann durch das Gewicht und genauso beim Gold. Und dann würde halt bei dem Würfel ein 8 rauskommen und beim Gold 20.“

Auf die anschließende Frage der Lehrkraft, ob man nun sagen könne, dass Gold schwerer als Eisen sei, antwortete S20: „Verhältnismäßig ist Gold schwerer als Eisen. Man sieht ja auf dem linken Bild zum Beispiel auch, da ist das Eisen ja schwerer, weil da auch deutlich mehr Eisen ist. Das bedeutet nur, dass, wie S7 schon gesagt hat, ein Würfel Gold schwerer ist als ein Würfel Eisen. Aber wenn es zum Beispiel ein Würfel Gold wäre und fünf Würfel Eisen, dann wäre Eisen ja wieder schwerer.“

Vergleich zu E2 Auch bei E2 wurde zunächst die Beschreibung der in der Aufgabe dargestellten Problematik eingefordert. S7 erklärte: „[M]an kann die Sachen nicht vergleichen, solange man nicht von beidem die gleiche Menge nimmt.“ Zudem ergänzte S7, dass Gold im Verhältnis der schwerste Stoff sei. S27 stimmte dem zu und erklärte: „auf der linken Seite wiegen zwei Würfel 40 Gramm. Wenn man rechts guckt, wiegen, wenn Eisen 40 Gramm wiegen soll, sind es fünf Würfel. Das sind ja mehr als bei Gold...“. Eine andere Erklärung lieferte S2: „Man kann auch einfach die Grammanzahl durch die Zahl teilen, die Anzahl der Würfel. Wenn ich jetzt 10 Würfel habe, wie bei dem Beispiel links von den Eisenwürfeln, kann ich einfach 80 durch 10 teilen.“ Auf die Nachfrage der Lehrkraft nach dem Ergebnis und dessen Interpretation, antwortete S2: „Ein Eisenwürfel wiegt 8 Gramm und das Gleiche kann man

auch mit dem Gold machen. 40 durch 2 sind 20 und ein Goldwürfel wiegt dann 20 Gramm. Das heißt, Gold ist schwerer als Eisen.“

Analog zu E3 wurde anschließend gefragt, ob man nun sagen könne, dass Gold schwerer als Eisen sei. S16 antwortete daraufhin, dass dies auf die Menge ankommt, und erklärte: „wenn man jetzt 100 Eisenwürfel hat und nur einen Goldwürfel, ist ja klar, dass die Eisenwürfel mehr wiegen. Aber wenn man jetzt einen Eisenwürfel und einen Goldwürfel, dann könnte man das besser beurteilen.“ Nach einer Präzisierung der Frage durch die Lehrkraft antwortete S7: „Wenn man im Verhältnis sieht, ist Gold schwerer als Eisen.“

Auftriebsvorstellung Zu Beginn der Plenumsphase forderte die Lehrkraft die Lernenden auf, mithilfe des Schokoriegelexperiments zu erklären, wieso Chloe mit der Aussage, dass das Volumen entscheidend für das Schwimmverhalten sei, falsch liegt. S26 erklärte: „Chloe sagt ja, dass große Gegenstände sinken und wir haben es ja gemacht, dass – wir haben Bounty ja durchgeschnitten zu einem kleinen Stück und das ist ja trotzdem gesunken, also kann das auf jeden Fall nicht stimmen.“

Die Frage, wieso die Masse ebenfalls nicht entscheidend für das Schwimmen und Sinken von Gegenständen ist, beantwortete S10 wie folgt: „Also wir haben den Bounty ja kleiner geschnitten und er ist aber trotzdem auf den Boden des Glases gesunken und der Milky Way war immer noch am Schwimmen.“

Die Lehrkraft entgegnete daraufhin, dass Jerome damit nicht zufrieden wäre und entgegnen würde, dass ja auch die Masse entscheidend sei. S12 erklärte: „Nein, ist sie nicht, weil wenn man den Bounty, haben wir ja durchgeschnitten, der ist trotzdem noch auf dem Boden geblieben und der war ja auch leichter als der Milky Way, aber es ist trotzdem auf dem Boden geblieben.“

Vergleich zu E2 Auch bei E2 sollte zunächst die Aussage von Chloe zur Abhängigkeit des Schwimmverhaltens vom Volumen mithilfe des Experiments widerlegt werden. S9 erklärte: „[D]a [im Experiment] haben wir ja auch den Bounty-Riegel kleiner geschnitten und trotzdem hat der nicht geschwommen.“ Zur Aussage von Jerome erklärte S2: „Wir haben den [Bounty-Riegel] ja durchgeschnitten und dass der dann leichter als der Milky Way ist und er ist ja trotzdem nicht geschwommen.“

Überprüfung der Regeln zum Auftriebsverhalten in gasförmigen Stoffen (F3.1.6)

Vier der 10 Gruppen (Gr1, Gr2, Gr8 & Gr10) bearbeiteten die Aufgabe zur Überprüfung der Regeln zum Auftriebsverhalten in gasförmigen Stoffen mithilfe der Simulation (3c, siehe Abbildung 9.19 in Abschnitt 9.2) nicht. Gr1 und Gr2 schafften es nicht, diese Aufgabe in der vorgegebenen Zeit zu bearbeiten, während Gr8 und Gr10 direkt zum Merktzettel übergingen, anstatt die Aufgabe zu bearbeiten.

Vier Gruppen (Gr4, Gr6, Gr7 & Gr9) versuchten, die Regeln in gasförmigen Stoffen zu überprüfen, kamen aber nicht auf den dafür notwendigen Schritt, den Aggregatzustand des blauen Stoffes ebenfalls auf gasförmig zu setzen, um die Dichte kleiner oder gleich der Dichte des grauen Stoffes einstellen zu können. Gr6 und Gr9 kamen zu dem Schluss, dass alle Regeln gültig sind, da die Regel für das Sinken bestätigt werden konnte. Gr7 kam zu dem Schluss, dass keine der Regeln anwendbar sei, da der blaue Stoff trotz Verschieben des Schiebereglers zur Einstellung der Dichte nicht aufstieg. Gr4 kam zu keinem Ergebnis.

Zwei Gruppen (Gr3 & Gr5) überprüften die Regeln und erkannten, dass der Aggregatzustand des blauen Stoffes auf gasförmig eingestellt werden muss. Jedoch kam nur Gr5 nach Überprüfung aller drei Regeln zu dem Schluss, dass alle Regeln auch für gasförmige Stoffe gelten. Gr3 kam hingegen zu dem Schluss, dass nur die Regeln für Aufsteigen und Sinken gelten, nicht aber die Regeln für das Schweben. Der Grund dafür ist, dass die Gruppe die Dichte des blauen Stoffes immer erst dann an die Dichte des grauen Stoffes anpasste, wenn sich der blaue Stoff bereits an der Oberfläche oder am Boden befand. Da sich dadurch die Lage des blauen Stoffes trotz gleicher Dichte nicht veränderte, kam die Gruppe zu der entsprechenden Schlussfolgerung.

Vergleich zu E2

In E2 zeigten sich teils ähnliche Vorgehensweisen bei der Überprüfung der Regeln. So gab es zwei Gruppen (Gr5 & Gr6), die es nicht schafften, die Aufgabe in der vorgegebenen Zeit zu bearbeiten.

Zwei Gruppen (Gr2 & Gr7) erkannten nicht, dass sie den Aggregatzustand des blauen Stoffes auf gasförmig einstellen müssen. Sie gelangten zu dem Schluss, dass die Regeln in gasförmigen Stoffen nicht gelten.

Zwei Gruppen (Gr1 & Gr8) überprüften die Regeln, stellten dafür den Aggregatzustand des blauen Stoffes auf gasförmig ein und gelangten zu dem Schluss, dass die Regeln ebenso in gasförmigen Stoffen gelten.

Im Gegensatz zu E3 gab es jedoch auch drei Gruppen, die zwar den Aggregatzustand des blauen Stoffes auf gasförmig einstellten und anschließend mit dem Schieberregler die Dichte veränderten, jedoch entweder keinen Schluss daraus zogen (Gr9) oder zu dem Schluss gelangten, dass die Regeln in gasförmigen Stoffen nicht gelten (Gr3 & Gr4).

10.2.3 Diskussion

Ziel dieses Abschnitts war es, zu evaluieren, inwiefern die Lernenden die Materialien wie intendiert bearbeiten (*F3.1*). Dazu wurden mehrere Subfragen formuliert und Ergebnisse dazu präsentiert. Im Folgenden sollen die zentralen Ergebnisse zusammengefasst und diskutiert werden, um die jeweiligen Subfragen und damit abschließend die übergeordnete Frage zu beantworten.

Übereinstimmungen und Abweichungen zwischen den Antworten der Lernenden und der Musterlösung (*F3.1.1*)

Würfelvorstellung Die Ergebnisse haben gezeigt, dass bei beiden Erprobungen insgesamt mindestens die Hälfte der Lernenden bei dem Großteil der Aufgaben zur Würfelvorstellung mindestens 75 % der Punkte oder mehr erreichten. Da die Punktzahlen hinsichtlich der Übereinstimmung mit den intendierten Lösungen der Musterlösung vergeben wurden, kann daraus abgeleitet werden, dass die Mehrheit der Lernenden die Materialien wie intendiert bearbeiteten. Zudem wurde bei jeder (Teil-)Aufgabe von mindestens einer Person die volle Punktzahl erreicht. Dies zeigt, dass alle Aufgaben wie intendiert gelöst werden können.

Bei der genaueren Betrachtung der Erkundungsphase zeigte sich, dass bei beiden Erprobungen nahezu alle Lernenden den „schwersten“ Stoff anhand des Süßigkeitenexperiments (1a), jedoch nur etwa 60 % (E3) bzw. 40 % (E2) anhand von Würfeldarstellungen (1b) bestimmen konnten. Der Großteil der übrigen Lernenden gab keine Antwort.

Aufgrund der zentralen Bedeutung der Aufgabe 1b für die genetische Erarbeitung der Würfelvorstellung ist diese Lösungshäufigkeit kritisch zu bewerten. Da der Großteil der Lernenden keine Antwort gab, spricht dies eher für ein Ausbleiben von Lösungsansätzen als für die Entwicklung falscher Strategien.

Als Ursachen für die geringere Lösungshäufigkeit von 1b kommen insbesondere (a) die fehlende Vorbesprechung der Aufgabe, (b) der höhere Abstraktionsgrad beim Wechsel von der enaktiven zur ikonischen Repräsentationsform und (c) die aus Lernendensicht möglicherweise nicht erkennbare Verwandtschaft der Aufgaben 1a und 1b infrage. Letzteres wurde bereits als potenzielle Hürde im Expertinnen- und Expertenreview angemerkt (siehe Tabelle A.1.1). Während in 1a Süßigkeiten in beliebige, gleich große Formen geschnitten und gewogen werden, ist in 1b die Form als Würfel vorgegeben und das Wiegen einzelner Würfel nicht möglich.

Um diesen Schwierigkeiten zu begegnen, erscheint der Einsatz gestufter Lernhilfen sinnvoll, welche die Idee „auf das gleiche Volumen bringen“ aus Aufgabe 1a aufgreifen und die Lernenden schrittweise zur Berechnung der Masse eines Kubikzentimeterwürfels in Aufgabe 1b hinführen.

Ergänzend könnte eine zusätzliche enaktive Aufgabe zwischen 1a und 1b helfen die Verwandtschaft der Aufgaben zu verdeutlichen und den Darstellungswechsel vorzubereiten. Dabei werden den Lernenden zwei physische Objekte aus verschiedenen Stoffen präsentiert, die aus unterschiedlich vielen Würfeln zusammengesetzt sind. Bei einem Objekt lassen sich die Würfel trennen (z. B. magnetisch verbundene Metallwürfel), während bei dem anderen Objekt gleich große Würfel lediglich angedeutet werden und fest miteinander verbunden sind (z. B. fest verklebte Holzwürfel oder 3D-gedruckte Objekte). Die Lernenden sollen dann ebenfalls bestimmen, welches der Objekte aus dem „schwersten“ Stoff besteht, indem sie jeweils die Masse eines Würfels bestimmen. Dabei können sie bei dem einen Objekt – analog zu Aufgabe 1a – einen einzelnen Würfel wiegen, während sie beim anderen Objekt – analog zu 1b – gezwungen sind, die Gesamtmasse auf die Anzahl der verbundenen Würfel zu beziehen. So können die Lernenden zunächst auf enaktiver Ebene das gedankliche Verteilen der Gesamtmasse auf die Würfel entdecken.

In der Phase des Erschließens scheint das Ausfüllen der Lücken zum Erklärvideo (3a) weitestgehend wie intendiert funktioniert zu haben. So erreichten alle Lernenden bei E3 und etwa 60 % bei E2 mehr als die Hälfte der Punkte; der Median lag bei 88 % (E3) bzw. 56 % (E2). Bei beiden Erprobungen wurde häufig die Beschreibung

der Dichte als „Stoffeigenschaft“ sowie die Beschriftung des griechischen Buchstaben „ ρ “ mit der Dichte offen gelassen. Bei E2 wurden zusätzlich häufig die Beschreibung der Dichte als „Masse eines Kubikzentimeter(-Würfels)“ sowie die Beschriftung der Symbole „g“ und „cm³“ offen gelassen.

Eine mögliche Erklärung für das häufige Fehlen der Lücken zur Beschreibung der Dichte könnte sein, dass im Gegensatz zu den anderen Lücken diese Lücken nicht exakt der Darstellung im Video entsprechen. Dementsprechend sollte das Video dahingehend optimiert werden, dass die Darstellung im Video mit der auf dem Arbeitsblatt übereinstimmt. Ein Grund für die fehlende Beschriftung von „ ρ “ könnte sein, dass die Lernenden den darunter stehenden Hinweis (siehe Abbildung 10.4) bereits als Ausfüllung interpretierten. Ein stärkeres Hervorheben der Lücke könnte somit die Lösungshäufigkeit erhöhen.

Dass bei E2 zusätzlich weitere Lücken offen gelassen wurden und der Median deutlich unter dem Wert von E3 lag, könnte darauf hindeuten, dass ein zweimaliges Anschauen des Videos für diese Lerngruppe nicht ausreichend war. Die insgesamt längeren Bearbeitungszeiten dieser Lerngruppe sind mit dieser Erklärung vereinbar. Ein wiederholtes Anschauen oder eine stärkere Segmentierung des Videos durch Pausen könnte demnach sinnvoll sein.

Die Aufgabe zur Unterscheidung zwischen „dicht“ und „schwer“ (3b) bereitete den Lernenden größere Schwierigkeiten. In beiden Erprobungen erreichte etwas weniger als die Hälfte der Lernenden in den Teilaufgaben (i) und (ii) keine Punkte. Teilweise verwechselten die Lernenden die Begriffe „Dichte“ und „Masse“ bzw. „Gewicht“. Dies bestätigt die Erkenntnisse in der Literatur, dass Lernende Schwierigkeiten bei der Differenzierung der Begriffe zeigen (Grüß-Niehaus & Schanze, 2010; Smith, 1985). Vor diesem Hintergrund ist dennoch positiv zu bewerten, dass bei beiden Erprobungen immerhin 50 % der Lernenden erkannten, dass die Masse bei gleichem Volumen betrachtet werden muss, wenn es um den Vergleich der Dichte geht (ii).

Der Lückentext zur Bestimmung der Dichte (4) scheint hingegen weitestgehend wie intendiert funktioniert zu haben, da bei beiden Erprobungen der Großteil der Lernenden (ca. 80 %) mindestens 50 % der Punkte erreichte und der Median bei 83 % lag. Besonders auffällig war, dass bei E3 alle Lernenden die Lücken mit der vorstellungsorientierten Berechnung der Masse eines Kubikzentimeterwürfels so-

wie der anschließenden Übersetzung des Ergebnisses in die Dichte richtig gelöst haben. Die dazu passende Rechnung wurde hingegen nur von 75 % und die Formel der Dichte nur von annähernd der Hälfte der Lernenden angekreuzt. Teils ähnliche Tendenzen zeigten sich auch bei E2. Im Gegensatz zu E3 gelang jedoch nur 67 % der Lernenden die Übersetzung der Masse eines Kubikzentimeterwürfels in die Dichte. Diese Ergebnisse lassen darauf schließen, dass die Veranschaulichung der Dichtebestimmung mithilfe der Verteilen-Grundvorstellung der Division – als Verteilen der Masse auf mehrere Kubikzentimeterwürfel – für die Lernenden scheinbar verständlich und somit eine geeignete Konkretisierung darstellt. Weiterhin scheint dem Großteil der Lernenden die Interpretation der Dichte als „Masse eines Kubikzentimeterwürfels“ an dieser Stelle bewusst gewesen zu sein. Die schrittweise Abnahme der Lösungshäufigkeit bei E3 von der vorstellungsorientierten Berechnung der Dichte (100 %), über die Formulierung der Rechnung mithilfe von Symbolen (75 %), bis hin zur Übersetzung der Divisionsrechnung in die Formel der Dichte in der Bruchschreibweise (54 %), kann als Bestätigung für den ansteigenden Abstraktionsgrad der Darstellungsebenen nach Leisen (2005) gesehen werden. Bei E2 konnte dieses Muster zumindest für den Schritt von der Rechnung zur Bruchschreibweise beobachtet werden. Die in der Aufgabe gewählte schrittweise Heranführung an die Symbolgleichung der Dichte durch den Übergang von konkreten zu abstrakten Darstellungen erscheint daher grundsätzlich sinnvoll. Die geringeren Lösungshäufigkeiten bei der Übersetzung in die Formel könnten sowohl auf Unsicherheiten bezüglich der Bedeutung des Bruchstrichs als auch auf Schwierigkeiten bei der Unterscheidung von Masse und Volumen zurückzuführen sein, da bei falschen Antworten diese Größen teilweise vertauscht wurden.

Der Merktzettel wurde bei beiden Erprobungen von allen Lernenden weitestgehend korrekt (mindestens 50 % der Punkte, $Mdn \geq 86$ %) bearbeitet. Punktabzug gab es bei beiden Erprobungen fast ausschließlich durch die fehlende Übersetzung von „Volumen“ in das Symbol „V“ sowie fehlende Antworten bei der Eintragung der Masse auf der Anzeige der Waage. Aus diesen Ergebnissen lässt sich schließen, dass die Merktzettel weitestgehend wie intendiert bearbeitet wurden, da die Lernenden überwiegend korrekte Lösungen entweder selbst generierten oder im Rahmen der Besprechung im Plenum ergänzten bzw. korrigierten. Eine mögliche Erklärung für die fehlenden Werte bei der Waage und dem Volumen könnte die vergleichsweise

geringe Größe der Lücken sein. Eine deutlichere Hervorhebung der Lücke könnte sich somit positiv auf die Lösungshäufigkeit auswirken.

In der Phase des Vertiefens (nur E3) konnte der Großteil der Lernenden die Dichte von Objekten weitgehend korrekt bestimmen (5a), was auf eine überwiegend wie intendierte Bearbeitung der Aufgabe schließen lässt.

In der Vertiefungsphase (nur E3) berechneten über 80 % der Lernenden die Dichte von Objekten (5a) in den Teilaufgaben (ii)-(iv) weitestgehend korrekt, was auf eine überwiegend wie intendierte Bearbeitung der Aufgabe schließen lässt. Allerdings wurde teilweise das Endergebnis der Berechnung nicht notiert, wie die geringere Lösungshäufigkeit bei Teilaufgabe (i) verdeutlicht, die ausschließlich das Notieren des Endergebnisses forderte. Dies deutet darauf hin, dass manchen Lernenden unklar war, was im letzten Schritt verlangt wurde. Eine mögliche Ursache könnte sein, dass die Bruchschreibweise bereits als fertiges Ergebnis angesehen wurde, statt als eine Aufforderung für die Division. Die Abnahme der Lösungshäufigkeit bei der Übersetzung der Divisionsgleichung in die Formel der Dichte in Aufgabe 4 stützt diese Erklärung. Eine Ergänzung des Materials um ein vollständiges Lösungsbeispiel, das den abschließenden Berechnungsschritt explizit zeigt, könnte dieser Problematik entgegenwirken.

Besondere Schwierigkeiten zeigten sich bei der Herleitung der Zusammenhänge zwischen Masse, Volumen und Dichte (7a), da über 70 % der Lernenden weniger als die Hälfte der möglichen Punkte erreichte. Dies zeigt, dass die Aufgabe kaum wie intendiert bearbeitet und womöglich zu schwierig für die Lernenden war.

Im Gegensatz dazu konnten 75 % der Lernenden die Dichte von Objekten zu mindestens 50 % korrekt vergleichen (7b) und der Median lag bei 67 %, was darauf hinweist, dass diese Aufgabe überwiegend wie intendiert bearbeitet wurde. Diese Ergebnisse sind überraschend, da das Verständnis der Zusammenhänge zwischen Dichte, Masse und Volumen, das in der vorherigen Aufgabe (7a) erarbeitet werden sollte, für 7b erforderlich war. Es scheint, dass die Lernenden implizit – möglicherweise durch die Lernmaterialien – Zugang zu diesen Kenntnissen gefunden haben. Möglicherweise standen individuelle Erklärungen der Lernenden in Konflikt mit den vorgefertigten Erklärungen in Aufgabe 7a, was die kognitiven Herausforderungen und die geringe Lösungshäufigkeit erklären könnte. Basierend auf diesen Annahmen sollte die Aufgabe 7a so umgestaltet werden, dass sie den Lernenden Frei-

raum gewährt, ihre eigenen Erklärungsansätze zu entdecken und zu formulieren, anstatt lediglich vorgefertigte Gedankengänge nachvollziehen zu müssen.

Hinsichtlich der Aufgabe 7b zeigte sich zudem, dass die Dichte häufiger korrekt verglichen wurde, wenn sich die Objekte im Volumen anstatt der Masse unterschieden. Dies ist ebenfalls überraschend, da aus empirischen Untersuchungen (z. B. Nunes et al., 2003) bekannt ist, dass Lernenden die antiproportionale Beziehung bei intensiven Größen schwerer fällt als die proportionale Beziehung. Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass in den vorherigen Aufgaben häufig die kleineren Objekte die größere Dichte bzw. die größeren Objekte die kleinere Dichte hatten (Aufgabe 1a und 1b). Die Lernenden könnten somit die intuitive Regel „je kleiner, desto größer die Dichte“ entwickelt haben, die einen vergleichsweise einfachen Dichtevergleich bei 7b ermöglicht. Ergebnisse aus dem Post-Test stützen diese Erklärung, da dort einige Lernende bei einem Dichtevergleich äußerten, dass das kleinere Stück immer das schwerere sei (siehe Abschnitt 10.4).

Eine Begründung für die Invarianz der Dichte gegenüber der Menge eines Stoffes (6b) konnten annähernd drei Viertel der Lernenden nicht angeben. Nahezu alle von ihnen gaben keine Antwort an. Eine Betrachtung der Videos ergab, dass viele der Lernenden zeitlich nicht mehr zu dieser Aufgabe gekommen sind. Eine abschließende Feststellung, inwieweit die Aufgabe wie intendiert bearbeitet wurde, lässt sich somit nicht treffen. Die wenigen korrekten Antworten der Lernenden zeigen jedoch, dass eine Bearbeitung der Aufgabe wie intendiert möglich ist.

Auftriebsvorstellung Die Ergebnisse haben gezeigt, dass bei beiden Erprobungen insgesamt etwa die Hälfte der Lernenden oder mehr bei dem Großteil der Aufgaben zur Auftriebsvorstellung die volle Punktzahl erreichten. Daraus kann abgeleitet werden, dass die Materialien überwiegend wie intendiert bearbeitet wurden. Zudem wurde bis auf die Erklärung des Seifenblasenexperiments (5a) bei jeder (Teil-)Aufgabe von mindestens drei Personen die volle Punktzahl erreicht. Dies zeigt, dass nahezu alle Aufgaben wie intendiert gelöst werden können.

Die Ergebnisse der Phase des Erschließens zeigten bei E3 und E2 ein unterschiedliches Bild hinsichtlich der Identifikation der für das Auftriebsverhalten verantwortlichen Eigenschaft (3a) sowie der Formulierung der Regeln für das Aufsteigen, Schweben und Sinken (3b).

Bei E3 löste jeweils lediglich etwa die Hälfte der Lernenden die Aufgaben vollständig korrekt. Eine Betrachtung der Antwortmuster der Lernenden ohne volle Punktzahl ergab, dass bei 10 der 13 Lernenden die in Aufgabe 3a gewählte Eigenschaft nicht mit den bei den Regeln angegebenen Eigenschaften übereinstimmte. Da sich allerdings aus der Entscheidung in 3a logisch die inhaltliche Ableitung der entsprechenden Eigenschaft in 3b ergeben sollte, könnte dies entweder auf ein mangelndes Text- und Aufgabenverständnis oder auf eine geringe Konzentration und eher oberflächliche Bearbeitung der Aufgaben hindeuten. Letzteres wird durch die auffällig hohen Ablenkungszeiten der Lernenden (vgl. S1, S2, S15, S16, S17, S21, S22 und S26 in Abbildung 10.13) sowie die nahezu identischen Lösungen benachbarter Lernender (siehe Abbildung 10.2) gestützt. Eine eindeutige Klärung der Ursachen würde eine Analyse der konkreten Bearbeitungsprozesse anhand der Videoaufzeichnungen erfordern. Dennoch sprechen die vorliegenden Erkenntnisse dafür, dass die nur mäßige Punkteverteilung bei E3 eher auf situative Faktoren als auf tatsächliche Schwierigkeiten im Umgang mit der Aufgabe zurückzuführen ist.

Bei E2 zeigte sich eine deutlich bessere Punkteverteilung als bei E3. So erreichten zwischen 80 und 90 % der Lernenden bei den jeweiligen Teilaufgaben mindestens die Hälfte der Punkte. Allerdings zeigte sich, dass bei der Formulierung der Regeln für das Aufsteigen und Sinken im Vergleich zum Schweben häufig nur 2 oder 2,5 von 3 Punkten erreicht wurden. Eine Betrachtung der Antwortmuster ergab, dass der Punktverlust überwiegend auf die Formulierung der korrekten Tendenzen mithilfe von Adjektiven des Massenvergleichs (z.B. „leichter“ statt „geringer“) zurückzuführen sind. Die Lernenden scheinen demnach die Aufgabe zwar wie intendiert bearbeitet zu haben, jedoch Schwierigkeiten bei der sprachlichen oder inhaltlichen Unterscheidung zwischen „Masse“ und „Dichte“ zu zeigen.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass die Aufgaben 3a und 3b bei E2 weitestgehend wie intendiert bearbeitet wurden, während die geringeren Punktzahlen in E3 eher auf eine oberflächliche bzw. situativ beeinträchtigte Bearbeitung als auf Schwierigkeiten mit der Aufgabe hindeuten.

Die Ergebnisse zum Merktzettel haben gezeigt, dass etwa 80 % der Lernenden bei E3 und alle Lernenden bei E2 diesen weitestgehend richtig bearbeiteten. Der Merktzettel wurde somit überwiegend wie intendiert bearbeitet, da die Lernenden die Regeln richtig formulierten oder mithilfe der Besprechung im Plenum korrigierten.

Letzteres wird dadurch gestützt, dass die Ergebnisse des Merktzettels im Vergleich zur Aufgabe 3b deutlich besser ausgefallen sind.

In der Vertiefungsphase (nur E3) konnten etwa 70 % der Lernenden das Schwimmen von Stoffen anhand ihrer Dichte vorhersagen (4a) und zu mindestens 50 % korrekt die Schicht bestimmen, in der zwei Gegenstände im Dichteturm verbleiben (4b_(i)). Dies zeigt, dass die Aufgaben weitestgehend wie intendiert bearbeitet wurden. Gleichzeitig wird damit deutlich, dass die beiden Aufgaben von deutlich mehr Lernenden korrekt gelöst wurden als 3b, jedoch von etwas weniger als die Aufgaben zum Merktzettel.

Während bei Aufgabe 3b die Auftriebsvorstellung eigenständig entdeckt bzw. erarbeitet werden musste, erforderten die Aufgaben 4a und 4b_(i) lediglich die Anwendung der Auftriebsvorstellung. Dass 4a und 4b_(i) häufiger korrekt bearbeitet wurden als 3b, lässt zwei mögliche Erklärungen zu: Entweder wurde die Auftriebsvorstellung erst durch Plenumsbesprechung und Merktzettel erworben, oder einzelne Aufgaben sind ohne diese Vorstellung lösbar. Letzteres trifft auf 4a zu, da sie auch auf Basis von Alltagserfahrungen (z. B. „Gase steigen in Flüssigkeiten immer auf.“) bewältigt werden kann. Für 4b_(i) ist hingegen ein Dichtevergleich – und damit die Auftriebsvorstellung – erforderlich.

Somit waren einige Lernende dazu in der Lage, die Auftriebsvorstellung lediglich durch das Nachtragen der besprochenen Lösungen auf dem Merktzettel anzuwenden. Dies unterstreicht zum einen die Bedeutung des Merktzettels sowie der Besprechung im Plenum und deutet zum anderen auf die Zugänglichkeit der Auftriebsvorstellung hin.

Deutlich mehr Schwierigkeiten schienen die Lernenden bei der Identifikation der Kunststoffe von zwei Kugeln innerhalb des Dichteturms (4b_(ii)) zu haben, da zwei Drittel der Lernenden diese Aufgabe nicht korrekt lösen konnten. Dieses Ergebnis deutet darauf hin, dass das Schließen auf die Dichte eines Objekts bei gegebenem Auftriebsverhalten und der Dichte des umliegenden Stoffes schwieriger zu lösen ist als das Schließen auf das Auftriebsverhalten bei gegebenen Dichten. Aufgrund der geringen Lösungshäufigkeit sollten gestufte Lernhilfen zu dieser Aufgabe ergänzt werden.

Hinsichtlich des Seifenblasenexperiments (5a) hat sich gezeigt, dass nur 20 % der Lernenden eine angemessene Beobachtung formulieren konnten. Eine adäquate

Erklärung konnte niemand liefern. Eine Betrachtung der Videoaufnahmen ergab, dass die Mehrheit der Lernenden die für die Bearbeitung der Aufgabe erforderliche Zeit nicht aufbringen konnte, insbesondere für die erforderlichen Erklärungen. Dies spiegelt sich in dem hohen Anteil an fehlenden Antworten der Lernenden wider. Insofern lässt sich keine abschließende Feststellung darüber treffen, inwiefern die Aufgabe wie intendiert bearbeitet wurde.

Die Analyse der Erklärungen, die von einem geringen Anteil der Lernenden abgegeben wurden, zeigt jedoch, dass das Experiment zu Missverständnissen führen kann. So führte die Beobachtung der schwebenden Seifenblasen bei einer Person zu der auf Basis der Auftriebsvorstellung durchaus naheliegende Erklärung, dass die Dichte der beiden Stoffe identisch sein muss. Das Aufliegen der Seifenblase auf dem Kohlenstoffdioxid mit der größeren Dichte wurde nicht in Betracht gezogen.

Um dieses Missverständnis zu vermeiden, sollte das Experiment dahingehend modifiziert werden, dass das Aufliegen der Seifenblase auf der Kohlenstoffdioxidschicht besser wahrgenommen werden kann. Eine Möglichkeit wäre das Verwenden eines Luft-Wasserstoff-Ballons, dessen Dichte insgesamt höher als die von Luft aber geringer als die von Kohlenstoffdioxid ist. Der Ballon könnte dann in einen Standzylinder gegeben und nach und nach Kohlenstoffdioxid eingeleitet werden, sodass der Ballon aufsteigt. Das Aufliegen auf der Kohlenstoffdioxidschicht könnte durch ein kurzes Herunterdrücken des Ballons und das anschließende, mit dem Auftauchen in Wasser vergleichbare, Aufsteigen verdeutlicht werden.

Ablenkungen (nur E3) Hinsichtlich der Ablenkungen konnte ein deutlicher negativer Zusammenhang (Spearman $\rho = -.82$, $p < .001$) zwischen Ablenkungen und der von den Lernenden erreichten Gesamtpunktzahl festgestellt werden. Somit lässt sich ableiten, dass eine hohe Ablenkung mit niedrigen Gesamtpunktzahlen einhergeht. Inwiefern die Ablenkungszeit eine Ursache oder Folge der niedrigen Gesamtpunktzahl darstellt, kann jedoch nicht geklärt werden. Dennoch könnte eine hohe Ablenkungszeit einen Erklärungsansatz für die teils sehr geringen Gesamtpunktzahlen der Lernenden bieten.

Bei der Betrachtung der Ablenkungen konnten zudem Auffälligkeiten bei zwei Gruppen identifiziert werden. Um mögliche Erklärungsansätze dafür zu finden, wurden entsprechende Videoaufnahmen der Gruppen analysiert. Bei den Lernen-

den S12 und S13, die eine hohe Gesamtpunktzahl bei einer gleichzeitig hohen Ablenkungszeit erreichten, konnte ein häufiges Abschreiben der Lösungen von S4 beobachtet werden. Die ähnlich hohe Punktzahl von S4 sowie die identischen Punktzahlen von S12 und S13 unterstreichen das Abschreiben als wahrscheinlichen Erklärungsansatz. Bei S14 und S4, die bei gleicher Ablenkungszeit deutlich unterschiedliche Gesamtpunktzahlen erreichten, konnte beobachtet werden, dass die Lernenden zwar häufig zusammen abgelenkt waren, jedoch die Materialien überwiegend in Einzelarbeit bearbeiteten. Dies lässt den Schluss zu, dass die Ablenkungszeit scheinbar einen unterschiedlichen Einfluss auf die Lernenden hatte. Ein möglicher Grund dafür könnte das individuelle Vorwissen der Lernenden sein: S4 erzielte im Prä-Test (siehe Abschnitt 10.4) 5 Punkte, S14 hingegen nur 0,5 Punkte (siehe Anhang F). Da Vorwissen als einer der wichtigsten Prädiktoren für Lernzuwachs gilt (Brühwiler et al., 2017), könnte dies die beobachteten Leistungsunterschiede zusätzlich begründen.

Fragen und Antworten zu den Situationen auf dem Jahrmarktbild F3.1.2

Anhand der Fragen der Lernenden zum Jahrmarktbild konnte bei beiden Erprobungen festgestellt werden, dass zu jeder Sprechblase eine entsprechende Warum-Frage formuliert wurde. Dies zeigt, dass der Inhalt der Sprechblasen die formulierten Fragen beeinflusst und somit die Formulierung der Fragen gesteuert werden kann.

Gleichzeitig wurden bei E3 auch darüber hinausgehende Fragen gestellt, die beispielsweise auf den Stoff der Gegenstände abzielten. Das Jahrmarktbild scheint also die Lernenden anzuregen, ihr Vorwissen über Stoffe und Stoffeigenschaften zu aktivieren und in die Fragen einzubeziehen. Dies konnte bei E2 allerdings nicht beobachtet werden. Eine mögliche Erklärung dafür könnte die mangelnde Vorbereitung der Lernenden auf den Stoffbegriff sein (siehe Abschnitt 10.1.1).

Darüber hinaus scheint das Jahrmarktbild Interesse und Neugierde zu wecken, da die Lernenden bei beiden Erprobungen auch verschiedene Situationen ohne Sprechblasen kommentierten oder Fragen dazu formulierten, obwohl dies nicht Teil der Aufgabenstellung war.

Bei der Beantwortung der Fragen zur Würfelvorstellung im Plenum wurde zunächst deutlich, dass bei beiden Erprobungen einige Lernende die Problematik in

der Situation mit dem Stärkewettbewerb wahrnehmen, beschreiben und mithilfe der Dichte erklären konnten. Darüber hinaus konnte durch das Zeichnen von Quadraten und den expliziten Hinweis der Lehrkraft auf die Würfelvorstellung der Zusammenhang zwischen der Dichte und der Masse eines Kubikzentimeterwürfels hergestellt werden.

Der Stärkewettbewerb stellt somit ein für die Lernenden erfassbares Problem dar und initiiert Fragen bei den Lernenden, die unter Anleitung der Lehrkraft retrospektiv mithilfe der gelernten Inhalte beantwortet werden können. Zudem scheint die Bezeichnung „Würfelvorstellung“ für Lernende verständlich zu sein und so eine explizite Kommunikation über die Grundvorstellung zu ermöglichen. Es bleibt jedoch offen, ob der explizite Hinweis, das Einzeichnen der Quadrate oder die Kombination beider Maßnahmen dazu geführt hat.

Bei der Beantwortung der Fragen zur Auftriebsvorstellung hat die Lehrkraft bei beiden Erprobungen die Fragen der Lernenden in Teilfragen gegliedert. Zunächst wurde die Teilfrage geklärt, welche Rückschlüsse auf die Dichte der sinkenden bzw. aufsteigenden Enten und Luftballons gezogen werden können. Die Beantwortung der Frage durch die Lernenden erfolgte auf der Grundlage der Dichte und unter Bezugnahme auf die umgebenden Stoffe, obwohl diese nicht explizit Teil der Fragestellung der Lehrkraft waren. Dies kann als Indiz dafür gewertet werden, dass der Bezug zum umgebenden Stoff in den Lernmaterialien deutlich gemacht wurde. Gleichzeitig konnten bei beiden Erprobungen Unsicherheiten bezüglich der Unterscheidung zwischen Schwimmen, Sinken und Schweben sowie bei der Identifikation des umgebenden Stoffes beobachtet werden. Diese konnten jedoch im Plenum geklärt werden. Eine mögliche Erklärung dafür könnte sein, dass das Schweben augenscheinlich eine starke Ähnlichkeit zum Schwimmen aufweist und zudem ein Hohlkörper (Ente) an der Grenzschicht zwischen Flüssigkeit und Luft betrachtet wird. Letzteres wurde nicht explizit in der Simulation behandelt, sodass die Lernenden einen Transfer von Vollkörpern innerhalb eines Fluids zu Hohlkörpern an einer Grenzschicht leisten mussten, der nach Peschel et al. (2021) nicht trivial ist. Es könnte daher sinnvoll sein, den Unterschied zwischen Schweben und Schwimmen expliziter in der Plenumsphase zu diskutieren, als es bisher in den beiden Erprobungen der Fall war.

Plausible Erklärungen für die Dichteunterschiede bei den Enten (eindringendes Wasser) oder den Ballons (Helium vs. Luft) konnten von einigen Lernenden auf-

grund ihrer Vorerfahrungen formuliert werden. Auch der von der Lehrkraft aufgeworfene Widerspruch bei E3, dass der Luftballon trotz vermeintlich gleicher Dichte in der Luft sinkt, konnte von einer Person mit der „Außenhülle“ des Luftballons erklärt werden. In diesem Fall wurde jedoch nicht die Dichte, sondern die Masse als Begründung herangezogen. Bei E2 erklärte dies eine Person sogar ohne Aufwerfen des Widerspruchs durch die Lehrkraft und mithilfe der Dichte. Insgesamt zeigt sich hier das Potenzial der Situation mit dem Ballonstand, weiterführende Fragen zur mittleren Dichte von Objekten zu thematisieren.

Sowohl bei der Würfel- als auch bei der Auftriebsvorstellung konnten bei E3 zwei Fragen zum jeweiligen Stoff der Objekte aus Zeitgründen nicht mehr beantwortet werden. Es ist jedoch zu vermuten, dass einige Lernende aufgrund von Alltagserfahrungen – beispielsweise mit Gummienten und Stoffen geringer Dichte wie Styropor – oder auch aufgrund der bei der Bearbeitung des Unterrichtsmaterials gewonnenen Erkenntnisse plausible Vermutungen über die Stoffe hätten anstellen können.

Es lässt sich festhalten, dass die Situation des Entenfischens und der Ballonstand Fragen bei den Lernenden initiieren, die unter der Moderation der Lehrkraft und der Formulierung von Teilfragen retrospektiv mithilfe der gelernten Inhalte und der Vorerfahrungen der Lernenden beantwortet werden können und eventuelle Missverständnisse oder Unsicherheiten aufdecken.

Lösungsstrategien zur Bestimmung des „schwereren“ Stoffes (F3.1.3)

Hinsichtlich der Lösungsstrategien zur Bestimmung des „schwersten“ Stoffes hat sich gezeigt, dass sowohl bei E3 als auch bei den restlichen Erprobungen in dem Großteil der Strategien die Stoffe auf das gleiche Volumen gebracht wurden oder die Masse im Verhältnis zum Volumen betrachtet wurde. Bei beiden Strategien wird die Masse in Relation zum Volumen betrachtet, was eine Antwort auf die Kernfrage „Wie lässt sich die Masse von Stoffen verhältnismäßig vergleichen?“ liefert und im Wesentlichen der Würfelvorstellung entspricht. Die Strategien konnten durch weitere Subcodes ausdifferenziert werden und auch innerhalb der Subcodes ließ sich eine Diversität in der individuellen Umsetzung der Strategien beobachten. Insgesamt gab es nur wenige Lernende, die keine, eine nicht nachvollziehbare oder eine nicht zielführende Strategie äußerten.

Hervorzuheben ist die Strategie zweier Lernender, die das Verhältnis von Volumen zu Masse berechneten, wobei sie zu einem falschen Schluss gelangten. Dennoch ist diese Strategie als geeignet zu bewerten, um die Kernfrage zu beantworten, wenngleich sie nicht der Würfelvorstellung entspricht. Im Unterrichtsgespräch sollte dieser Strategie demnach mit Wertschätzung begegnet werden. Gleichzeitig sollte deutlich gemacht werden, dass eine Betrachtung des Verhältnisses von Volumen zur Masse ebenso korrekt ist, sich in den Naturwissenschaften jedoch auf eine Betrachtung des Verhältnisses von Masse zu Volumen geeinigt wurde.

Insgesamt lässt sich aus den Ergebnissen schließen, dass die Aufgabe es den Lernenden ermöglicht, eigenständige Lösungsideen zur Kernfrage zu entwickeln, die im Wesentlichen der Würfelvorstellung entsprechen. Die Vielfalt in der individuellen Umsetzung dieser Strategien kann als ein Hinweis darauf interpretiert werden, dass die Aufgabe eine geeignete Konkretisierung zur Umsetzung des genetischen Prinzips (DP1) ist. Demnach scheint die Aufgabe größtenteils wie intendiert zu funktionieren.

Hinsichtlich der Beschreibung der Strategien wurde festgestellt, dass einige Lernende (14 % bei E3, 47 % bei E0-E2) ihre Strategie mithilfe von Würfeln ausdrückten.

Dies lässt die Annahme zu, dass die Darstellung des Volumens in Form von Kubikzentimeterwürfeln die Lernenden möglicherweise bei der Entwicklung und Formulierung der Lösungsstrategien unterstützt. Dies kann als Bestätigung für das Designprinzip der Verwendung und Vernetzung von Darstellungen (DP2) zur Vermittlung von Grundvorstellungen interpretiert werden.

Gleichzeitig bezogen sich die übrigen Lernenden auf das Volumen oder auf „Kubikzentimeter“. Die Lernenden scheinen somit bereits in der Lage gewesen zu sein, die Strategien abstrahierend von konkreten Würfeln zu formulieren. Es kann jedoch nicht mit Sicherheit festgestellt werden, inwiefern die Würfeldarstellung diese Lernenden möglicherweise dennoch bei der Entwicklung ihrer Strategien unterstützt hat. Eine Analyse der Videoaufnahmen könnte hier Aufschluss geben.

Vermutungen und Begründungen der Lernenden zum Auftriebsverhalten der Schokoriegel (F3.1.4)

Bei der Untersuchung des Schwimmverhaltens von Bounty und Milky Way (1a) vermuteten bei beiden Erprobungen nahezu alle Lernenden, dass der Milky Way schwimmen würde, da er leichter, kleiner oder beides zugleich ist. Das Experiment scheint somit wie intendiert zu funktionieren und dazu beizutragen, die beiden typischen Vorstellungen, dass die Masse oder das Volumen entscheidend für das Schwimmen und Sinken ist, zu aktivieren.

Bei der Untersuchung des Schwimmverhaltens eines im Vergleich zum Milky Way-Riegel kleineren und leichteren Stück Bounty (1b), vermutete hingegen bei beiden Erprobungen der Großteil der Lernenden, dass das Stück Bounty *nicht* schwimmt. Dieses Ergebnis ist überraschend und widerspricht den Erwartungen, da die Lernenden aufgrund der Begründungen im vorherigen Experiment das Schwimmen des Bounty-Stücks hätten vermuten müssen. Das beabsichtigte Auslösen eines kognitiven Konflikts scheint somit ausgeblieben zu sein.

Um mögliche Erklärungen für dieses Ergebnis zu finden, wurden zusätzlich die Videos untersucht. Es zeigte sich, dass einige Gruppen das Experiment durchführten, *bevor* sie eine Vermutung äußerten. Außerdem führten die Gruppen das Experiment zu unterschiedlichen Zeitpunkten durch, sodass ein Abschauen des Ergebnisses bei den schnelleren Gruppen nicht ausgeschlossen werden kann. Diese Faktoren könnten dazu geführt haben, dass die Lernenden ihre ursprünglichen Vermutungen auf Basis der beobachteten Ergebnisse anpassten.

Dennoch ist es wahrscheinlich, dass einige Lernende die Vermutung geäußert haben, ohne das Ergebnis des Experiments zu kennen.

Eine mögliche Erklärung dafür könnte sein, dass durch das Durchschneiden des Bounty-Riegels andere Faktoren als „Masse“ oder „Volumen“ in den Vordergrund rücken, z. B. die Füllung oder die Öffnung des Riegels durch das Durchschneiden. Für diese Erklärung sprechen einige der Begründungen der Lernenden wie „es liegt am Material“, „es liegt an der Konsistenz“ oder „es wird schwerer durch eindringendes Wasser“.

Die letztgenannte Begründung ist besonders kritisch zu betrachten, da die Lernenden durch das Ergebnis des Experiments in ihrer Vorstellung bestärkt werden, dass die Masse entscheidend für das Schwimmen und Sinken ist – eine Vorstellung,

die das Experiment eigentlich widerlegen sollte. Um dies zu vermeiden, könnte das Experiment dahingehend optimiert werden, dass statt eines kleingeschnittenen Bounty-Riegels ein Bounty-Mini verwendet wird. Dadurch wäre kein Durchschneiden mehr nötig.

Hinsichtlich der Begründungen hat sich zudem gezeigt, dass in beiden Erprobungen mehrere Lernende mit der Dichte argumentierten. Die Lernenden scheinen somit Erkenntnisse der bereits erarbeiteten Würfelvorstellung in den Kontext des Schwimmens und Sinkens zu übertragen. Ein möglicher Auslöser dafür könnte das Schneiden des Bounty-Riegels gewesen sein, das an das Schneiden bei dem Süßigkeitenexperiment der Würfelvorstellung erinnerte und so als ein Hinweisreiz diente.

Beantwortung der Reflexionsaufgaben im Plenum (F3.1.5)

Hinsichtlich der Reflexionsaufgabe der Würfelvorstellung zeigten die geäußerten Beiträge von einigen Lernenden in beiden Erprobungen, dass sie in der Lage waren, den Begriff „verhältnismäßig schwerer“ zu erklären. Weiterhin konnten sie erkennen, dass Gold im Vergleich zu Eisen verhältnismäßig schwerer ist. Einige der Lernenden begründeten dies mithilfe der Masse von einem Würfel und gaben auch deren Berechnung an. Die Erklärung formulierten sie dabei ausschließlich mithilfe von Würfeln anstelle des abstrakten Begriffs des Volumens.

Diese Beobachtungen legen nahe, dass die Reflexionsaufgabe zur Würfelvorstellung erfolgreich dazu beiträgt, die Problematik des Massenvergleichs von Stoffen sowie die Lösungsideen aus der Erkundungsphase aufzugreifen und zu diskutieren. Darüber hinaus scheint die Darstellung des Volumens mithilfe von Kubikzentimeterwürfeln einige Lernende bei der Entwicklung und Formulierung von Lösungsstrategien zu unterstützen.

Hinsichtlich der Reflexionsaufgabe der Auftriebsvorstellung zeigten die geäußerten Beiträge von einigen Lernenden in beiden Erprobungen, dass die Lernenden mithilfe der gewonnenen Erkenntnisse aus dem Schokoriegelexperiment die Behauptungen, dass das Volumen oder die Masse entscheidend für das Schwimmen und Sinken sei, widerlegen konnten.

Diese Beobachtungen legen nahe, dass die Reflexionsaufgabe zur Auftriebsvorstellung erfolgreich dazu beiträgt, die Ergebnisse des Schokoriegelexperiments aus der

Erkundungsphase zu reflektieren und anhand dessen die alternativen Vorstellungen – die Masse bzw. das Volumen sei für das Schwimmverhalten entscheidend – zu falsifizieren.

Überprüfung der Regeln zum Auftriebsverhalten in gasförmigen Stoffen (F3.1.6)

Die Ergebnisse zur Überprüfung der Regeln zum Auftrieb in gasförmigen Stoffen (3c) in beiden Erprobungen haben gezeigt, dass die Aufgabe nur von wenigen Gruppen wie intendiert bearbeitet wurden. Häufig wurde die Aufgabe nicht bearbeitet, übersprungen oder die Lernenden kamen nicht auf die Idee, dass der Aggregatzustand des blauen Stoffes bzw. Gegenstandes ebenfalls auf gasförmig gestellt werden muss.

Eine Erweiterung der Aufgabe, in der die Lernenden ihre Überprüfung der Regeln schriftlich festhalten müssen, könnte dem Überspringen bzw. Übersehen der Aufgabe entgegenwirken. Außerdem sollte in der Aufgabe explizit darauf hingewiesen werden, dass der Aggregatzustand des blauen Stoffes bzw. Gegenstandes entsprechend angepasst werden muss.

Bei E2 gab es jedoch auch einige wenige Gruppen, die zwar den Aggregatzustand des blauen Stoffes auf gasförmig gestellt und anschließend die Dichte per Schieberegler variierten, jedoch zu keinem Schluss oder zur Verwerfung der Regeln kamen. In den Videos ließen sich jedoch keine genauen Ursachen dafür identifizieren. Möglicherweise haben diese Gruppen die Simulation eher oberflächlich bearbeitet (Illusion of Understanding, siehe Abschnitt 3.4) ohne die beobachtbaren Veränderungen in der Simulation nachzuvollziehen.

10.2.4 Zusammenfassung und Fazit

In diesem Abschnitt wurde untersucht, inwiefern die Lernmaterialien wie intendiert bearbeitet wurden. Dazu wurden die einzelnen Designelemente wie Aufgaben und Plenumsphasen bepunktet, induktiv codiert oder deskriptiv analysiert.

Dabei konnten wichtige Erkenntnisse hinsichtlich der intendierten Bearbeitung der Lernmaterialien und Funktionsweisen der Designelemente gewonnen werden. So erreichte bei beiden Erprobungen in der Regel etwa die Hälfte der Lernenden

oder mehr bei der Mehrzahl der Aufgaben mindestens 50 % der möglichen Punkte; bei den Aufgaben zur Würfelvorstellung lag dieser Anteil häufig sogar bei mindestens 75 %. Bei der Auftriebsvorstellung erzielte zudem ein großer Teil der Lernenden bei vielen Aufgaben die volle Punktzahl.

Somit scheint eine Bearbeitung der Lernmaterialien wie intendiert möglich und weitestgehend erfolgt zu sein.

Optimierung der Materialien Anhand der qualitativen Betrachtung der Abweichungen von der intendierten Lösung konnten zudem mögliche Erklärungsansätze gefunden und Optimierungen der Lernmaterialien abgeleitet werden. Die Optimierungen umfassen:

- das Ergänzen von gestuften Lernhilfen und einer enaktiven Zwischenaufgabe bei der Bestimmung des „schwersten“ Stoffes anhand von Würfeldarstellungen (1b)
- das Optimieren der Kongruenz zwischen Darstellungen im Erklärvideo und Lückentext sowie das Hervorheben der Lücke zur Beschriftung des griechischen Buchstabens „ ρ “ (3a)
- das Hervorheben der Lücke zur Eintragung des Wertes auf der Waage (Merkzettel)
- das Ergänzen eines vollständigen Lösungsbeispiels zur Bestimmung der Dichte von Objekten (5a)
- das Gewähren eines Freiraums zur Entdeckung und Formulierung eigener Erklärungsansätze bei der Herleitung der Zusammenhänge zwischen Masse, Volumen und Dichte (7a)
- das Ersetzen eines kleingeschnittenen Bounty-Riegels durch ein Bounty-Mini bei dem Schokoriegelexperiment (1b)
- das Ergänzen eines Hinweises zur Anpassung des Aggregatzustandes des blauen Stoffes bzw. Gegenstandes sowie eines schriftlichen Bearbeitungsteils bei der Überprüfung der Regeln zum Auftrieb in gasförmigen Stoffen (3c)
- das Ergänzen von gestuften Lernhilfen bei der Identifikation der Kunststoffe von zwei Kugeln innerhalb des Dichteturms (4b_(ii))

- eine Modifikation des Experiments zur besseren Wahrnehmbarkeit des Auf-
liegens auf der Kohlenstoffdioxidschicht (5a)

Im Hinblick auf zukünftige Forschungsschritte ist geplant, die vorgeschlagenen Optimierungsmöglichkeiten umzusetzen und mithilfe weiterer Erprobungen zu evaluieren.

Spezifische Ergebnisse zu bestimmten Designelementen Einige Ergebnisse lieferten zudem Hinweise hinsichtlich der Funktionsweisen einzelner Designelemente.

So deuteten die Fragen der Lernenden zum Jahrmarktbild und die Beantwortung dieser im Plenum an, dass das Jahrmarktbild bei Lernenden wie intendiert Fragen initiiert, die unter Moderation der Lehrkraft retrospektiv mithilfe der gelernten Inhalte bzw. Grundvorstellungen und dem Vorwissen der Lernenden beantwortet werden können.

Zudem scheint das Bild Neugierde zu wecken und zur Aktivierung von Vorwissen zu Stoffen und Stoffeigenschaften anzuregen, da teilweise Fragen zu Situationen ohne Sprechblasen oder Fragen zu den Stoffen der Gegenstände formuliert wurden, obwohl dies nicht Teil des Arbeitsauftrags war.

Weiterhin zeigte sich, dass die Merktzettel insbesondere im Vergleich zu anderen Aufgaben größtenteils korrekt bearbeitet wurden. Damit scheinen die Merktzettel in Kombination mit der Besprechung dieser im Plenum eine geeignete Methode zur Sicherung der zentralen Inhalte zu sein.

Auch die Reflexionsaufgaben scheinen wie intendiert zu funktionieren und zur Reflexion der Inhalte aus der Erkundungsphase anzuregen. So konnten die Problematik des Massenvergleichs von Stoffen und verschiedene Lösungsstrategien der Lernenden aufgegriffen werden (Würfelvorstellung). Zudem wurden auf Basis der Erkenntnisse des Schokoriegelexperiments alternative Vorstellungen erfolgreich falsifiziert (Auftriebsvorstellung).

Bezüglich der Würfelvorstellung deutete die Vielfalt der entwickelten und zielführenden Lösungsstrategien zur Bestimmung des „schwersten“ Stoffes (1b) darauf hin, dass die Aufgabe den Lernenden wie intendiert ein aktives und selbstgesteuertes Entdecken der Kernidee der Würfelvorstellung – die Masse bei gleichem Volumen zu betrachten – im Sinne des genetischen Lernens ermöglicht.

Im Einklang damit konnten einige Hinweise identifiziert werden, die auf eine unterstützende Wirkung der Würfeldarstellungen bei der Entwicklung und Formulierung der Lösungsstrategien hindeuten. So formulierten alle Lernenden in den mündlichen Beiträgen zur Reflexionsaufgabe und mehrere Lernende bei Aufgabe 1b ihre Antwort mithilfe von Würfeln anstelle des Volumens.

Darüber hinaus scheint die Bezeichnung „Würfelvorstellung“ für Lernende verständlich zu sein und eine explizite Kommunikation über die Grundvorstellung zu ermöglichen.

Weiterhin spiegelte sich der antizipierte Anstieg des Abstraktionsgrades bei der Bestimmung der Dichte (4) von der vorstellungsorientierten Berechnung der Dichte, über die Formulierung der Rechnung mit Symbolen, bis hin zur Übersetzung der Divisionsrechnung in die Formel der Dichte, in den Lösungshäufigkeiten wieder.

Bezüglich der Auftriebsvorstellung deutete es sich an, dass das Schokoriegelexperiment wie intendiert dazu in der Lage ist, die beiden typischen Vorstellungen, dass die Masse oder das Volumen entscheidend für das Auftriebsverhalten ist, bei Lernenden zu aktivieren. So begründeten nahezu alle Lernenden das Schwimmen des Milky Way-Riegels mit der Masse oder dem Volumen (1a).

Das anschließende Auslösen eines kognitiven Konfliktes schien jedoch nicht funktioniert zu haben, da der Großteil der Lernenden wider Erwarten vermutete, dass das im Vergleich zum Milky Way-Riegel kleinere und leichtere Stück Bounty nicht schwimmt. Auf Basis der Videos wurde das Beobachten des Versuchsergebnisses vor dem Aufstellen der Vermutung als ein möglicher Grund für dieses Ergebnis identifiziert.

Fazit Insgesamt lässt sich mit Bezug auf die übergeordnete Forschungsfrage festhalten, dass die Lernenden die Materialien weitestgehend wie intendiert bearbeitet haben. Die Unterrichtskonzeption mit den begleitenden Lernmaterialien insgesamt, sowie spezifische Designelemente, scheinen daher wie beabsichtigt zu funktionieren. Zudem wurden einige Optimierungen präsentiert, die das Ergebnis weiter verbessern könnten.

10.3 Evaluation der Unterrichtskonzeption mit begleitenden Lernmaterialien

F3.2 Wie bewerten Lernende die Unterrichtskonzeption mit begleitenden Lernmaterialien?

F3.2.1 Wie bewerten die Lernenden die allgemeine Struktur und Verständlichkeit der Lernmaterialien?

F3.2.2 Wie bewerten die Lernenden den Schwierigkeitsgrad der Lernmaterialien?

F3.2.3 Wie bewerten Lernende den Spaßfaktor bei der Bearbeitung der Aufgaben, Simulationen und Experimente?

F3.2.4 Inwiefern bewerten die Lernenden die Strukturierungselemente als hilfreich?

F3.2.5 Wie bewerten die Lernenden die Funktionsweise ausgewählter Designelemente?

F3.2.6 Inwiefern bewerten die Lernenden die Würfel- und Auftriebsvorstellung als verständlich und nützlich?

F3.2.7 Welche Aspekte gefallen den Lernenden besonders und wo sehen sie das größte Verbesserungspotential?

10.3.1 Methodik

Die Bewertung der Unterrichtskonzeption mit begleitenden Lernmaterialien durch Lernende wurde mittels eines Fragebogens erhoben. Die Fragebogenmethode ist in diesem Fall eine geeignete Methode, da es um die Erfassung der persönlichen Sichtweise der Lernenden zu bestimmten Aspekten der Unterrichtskonzeption geht (Krüger et al., 2014).

Allgemeiner Aufbau des Fragebogens Insgesamt setzt sich der Fragebogen aus 23 ratingskalierten Items und zwei offenen Items zusammen. Letztere fragen nach positiv zu bewertenden und verbesserungswürdigen Aspekten der Unterrichtskonzeption mit begleitenden Lernmaterialien. Dies ermöglicht eine zeiteffiziente und

gezielte Erhebung der persönlichen Sichtweise und bietet gleichzeitig Raum für individuelle Anmerkungen.

Bei den Items wurde sich für eine ungerade Skalierung mit fünf Stufen entschieden, da insbesondere bei der Beurteilung des Schwierigkeitsgrades eine neutrale Position zur Erfassung eines angemessenen Schwierigkeitsgrades benötigt wird. Weiterhin wurde als Antwortmöglichkeit *Kann ich nicht sagen* ergänzt, da einzelnen Items auf optionale Elemente der Lernmaterialien wie beispielsweise Tipps abzielen, die nur bei Verwendung dieser Elemente sinnvoll bewertet werden können.

Insgesamt wurde auf eine möglichst einfache und kurze Formulierung der Items geachtet und die Ratingskala wurde zusätzlich mit Smileys versehen, um den Fragebogen an die Zielgruppe von Lernenden der 7. Jahrgangsstufe anzupassen.

Zudem wurde auf ein übersichtliches Layout, den sparsamen Einsatz negativ gepolter Items sowie die Gruppierung der Items in thematische Themenblöcke geachtet, um das Ausfüllen des Fragebogens für die Lernenden zu erleichtern und die Datenqualität zu erhöhen (Döring & Bortz, 2016). Ein Ausschnitt des Fragebogens ist in Abbildung 10.15 dargestellt. Der gesamte Fragebogen ist im Anhang D.3 zu finden.

Verwendete Items Im Folgenden werden die einzelnen Items des Fragebogens vorgestellt. Die Begriffe in den Klammern entsprechen dabei den Kurzbezeichnungen der Items in der Ergebnisdarstellung.

Um die Verständlichkeit und Struktur der Lernmaterialien zu evaluieren (F3.2.1), wurden drei Items entwickelt. Die Lernenden sollten angeben, inwiefern sie die Arbeitsblätter als übersichtlich empfanden (Übersichtlichkeit), ob sie sich auf den Arbeitsblättern gut zurechtfinden konnten (Orientierung) und ob bei den Aufgaben klar war, was zu tun ist (Aufgabenverständlichkeit).

Hinsichtlich des Schwierigkeitsgrades (F3.2.2) wurde zunächst allgemein gefragt, inwiefern die Lernenden die Aufgaben insgesamt als zu schwierig empfanden (Aufgaben zu schwierig). Um neben der kognitiven auch die sprachliche Belastung zu berücksichtigen, wurde zudem gefragt, inwiefern die Lernenden den schriftlichen Arbeitsanteil als gering empfanden (Schreibaufwand gering). Weiterhin wurde erfragt, inwiefern die Schieberegler zur Simulation „Aufsteigen, Schweben und Sinken“ als überfordernd wahrgenommen wurden (Schieberegler überfordernd), da ein richtiges Maß an Interaktivität eine wichtige Gelingensbedingung für Simulationen darstellt (siehe Abschnitt 3.4).

Abbildung 10.15

Ausschnitt des verwendeten Fragebogens



Evaluationsbogen

Bitte kreuze jeweils die Option an, die deiner Meinung am besten entspricht. Denke daran, es gibt keine richtigen oder falschen Antworten und deine Antworten werden anonymisiert.

Aussage	 Ich stimme überhaupt nicht zu	 Ich stimme nicht zu	 Ich bin neutral	 Ich stimme zu	 Ich stimme völlig zu	Kann ich nicht sagen
Die Arbeitsblätter waren übersichtlich.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Auf den Arbeitsblättern konnte man sich gut zurecht finden.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Die Experimente haben Spaß gemacht.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Es war überraschend, dass das kleine und leichte Stück Bounty untergeht.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Die Darstellung der Versuchsschritte als Bilder war hilfreich.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Das Abhaken der Versuchsschritte war hilfreich.	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Hinsichtlich des Spaßfaktors (*F3.2.3*) wurde erfragt, inwiefern den Lernenden die Experimente, die Simulationen sowie die Aufgaben Spaß gemacht haben. Da Simulationen und Experimente tendenziell mit einem höheren Spaßempfinden einhergehen (Barke et al., 2018; Wilzek, 2021), wurde der Spaßfaktor nicht durch ein einzelnes Item, sondern gezielt für die drei Elemente erfasst.

Zur Erhebung der Funktionsweisen der Designelemente (*F3.2.5*) wurden verschiedene Items formuliert (siehe Tabelle 10.6).

Tabelle 10.6
Zuordnung der Items zu den Funktionsweisen der Designelemente

Designelement	Funktionen	Item
Schokoriegel-experiment	kognitiven Konflikt initiieren	Es war überraschend, dass das kleine und leichte Stück Bounty untergeht (kogn. Konflikt)
Merkzettel	Grundvorstellung und weitere zentrale Inhalte hervorheben	Die Merkwörter machen deutlich, was besonders wichtig ist (Relevanz von Inhalten)
Jahrmarktbild	Überblick über erarbeitete Grundvorstellungen bieten	Das Jahrmarktbild hat geholfen, einen Überblick über die Vorstellungen zur Dichte zu gewinnen (Überblick)
	Orientierung für den Stundenverlauf bieten	Das Jahrmarktbild und die Fragen haben eine gute Orientierung für den Stundenverlauf gegeben (Orientierung)

Dabei wurden genau die Designelemente und Funktionen aufgegriffen, die für Lernende potentiell wahrnehmbar und beurteilbar sind, sodass nicht alle intendierten Funktionsweisen und Designelemente erfasst werden konnten.

Zur Erfassung des Unterstützungspotentials verschiedener Strukturierungselemente (F3.2.4) sollten die Lernenden bewerten, inwiefern sie die Darstellung der Versuchsschritte als Bilder (Bebilderung der Versuche), das Abhaken der Versuchsschritte (Abhaken der Schritte), die Tipps während der Simulation zum „Aufsteigen, Schweben und Sinken“ (Tipps zur Simulation), die häufige Paararbeit (Paararbeit) sowie die Besprechungen in der gesamten Klasse (Plenumsdiskussionen) als hilfreich empfanden. Zudem wurde gefragt, ob die Lernenden durch die Aufgabenüberschriften wussten, was einen in der Aufgabe erwartet (Aufgabenüberschriften). Es ist anzumerken, dass auch bei E3 lediglich nach den Tipps der Simulation gefragt wurde, um die Vergleichbarkeit zu den anderen Erprobungen zu gewährleisten. Für eine noch umfassendere Erfassung hätte es sich zudem angeboten, auch die Tipps bei den Vertiefungsaufgaben einzubeziehen.

Die Evaluation der Grundvorstellungen (F3.2.6) erfolgte anhand mehrerer Items. Zum einen wurde gefragt, inwiefern nach der Stunde verständlich ist, was mit der Würfel- bzw. der Auftriebsvorstellung gemeint ist (Verständlichkeit). Zum anderen sollten die Lernenden beurteilen, inwiefern sie die Würfel- bzw. Auftriebsvorstellung als unterstützend bei der Bearbeitung mancher Aufgaben wahrgenommen haben (Nutzen). Da die Nutzungsweise einer Darstellung für Lernende möglichst intuitiv verständlich sein sollte (Möller et al., 2002), wurde zudem gefragt, inwiefern sich das Vorstellen der Dichte als Masse eines Kubikzentimeterwürfels als einfach erweist (Vorstellbarkeit). Für die Auftriebsvorstellung wurde kein analoges Item formuliert, da hier keine eindeutige bildliche Darstellung vorliegt, die eine intuitive Nutzung erleichtern könnte.

Datenerhebung und -auswertung Wie bereits im Ablauf der Erprobung E2 (siehe Abschnitt 10.1) beschrieben, fand sowohl nach der ersten als auch nach der zweiten Unterrichtseinheit eine Evaluation statt. Die Auswahl der hier vorgestellten Items wurde entsprechend der Inhalte der beiden Unterrichtseinheiten angepasst. Beispielsweise wurden Items zu den Experimenten ausschließlich im Rahmen der ersten Evaluation eingesetzt, da beide Experimente in der ersten Unterrichtseinheit durchgeführt wurden.

Items, die sich auf Inhalte beider Unterrichtseinheiten beziehen (z. B. Items zur Verständlichkeit und Struktur), wurden hingegen bei beiden Evaluationen eingesetzt. Im Rahmen der Datenanalyse wurden bei diesen Items die Antworten zu den beiden Evaluationszeitpunkten jeweils zur Hälfte gewichtet. Dies stellt sicher, dass die Bewertung der Lernenden bei beiden Zeitpunkten gleich gewertet wurden und die Ergebnisse beider Erprobungen besser miteinander in Beziehung gesetzt werden können.

Es bleibt anzumerken, dass bei E2 das Item zur Nützlichkeit der Auftriebsvorstellung nicht zum Einsatz kam, da dieses aufgrund fehlender Anwendungsaufgaben nicht sinnvoll beantwortet werden konnte.

Für die Datenauswertung wurden die Antworten der Lernenden in eine Excel-Tabelle übertragen. Den Antwortmöglichkeiten von *Ich stimme überhaupt nicht zu* bis *Ich stimme vollkommen zu* wurden die Zahlen 1 bis 5 zugeordnet, während die Antworten der offenen Items wörtlich übernommen wurden. Anschließend wurden die Häufigkeiten pro Antwortmöglichkeit für jedes Item berechnet. Falls eine

Person zwei benachbarte Antwortmöglichkeiten angekreuzt hat (z. B. *Ich stimme zu* und *Ich stimme vollkommen zu*), wurde die Häufigkeit für jede dieser Möglichkeiten um 0,5 erhöht. Dadurch wurde sichergestellt, dass alle Antworten mit der gleichen Gewichtung in die Analyse einfließen. Falls eine Person sowohl eine positive als auch negative Zustimmung angekreuzt hat, wurden diese Antworten aufgrund der Uneindeutigkeit als *keine Antwort* gewertet. Die Ergebnisse der geschlossenen Items und entsprechende Berechnungen sind im Anhang F zu finden.

Die Antworten der offenen Items (siehe Anhang F) wurden in MAXQDA eingepflegt und anschließend durch eine induktive Codierung thematisch zusammengefasst.

10.3.2 Ergebnisse & Diskussion

Verständlichkeit und Struktur (F3.2.1) Die Ergebnisse zur allgemeinen Struktur und Verständlichkeit der Lernmaterialien sind in der Tabelle 10.7 dargestellt.

Tabelle 10.7

Antworthäufigkeiten zur Bewertung der allgemeinen Struktur und Verständlichkeit der Lernmaterialien

Item	x	--	-	0	+	++
Übersichtlichkeit	1	0	0	2	11	9
Orientierung	0	0	0	4	7.5	11.5
Aufgabenverständlichkeit	0	0	1	6	6	11

Anmerkung. x = Kann ich nicht sagen, -- = Ich stimme überhaupt nicht zu, - = Ich stimme nicht zu, 0 = Ich bin neutral, + = Ich stimme zu, ++ = Ich stimme völlig zu.

Es zeigt sich, dass bei allen Items der Großteil der Lernenden entweder zustimmte oder vollkommen zustimmte, wobei eine Tendenz zur vollständigen Zustimmung bei der Orientierung und Aufgabenverständlichkeit zu beobachten ist.

Bei E2 sind vergleichbare Tendenzen erkennbar (siehe Tabelle A.5.1). Insgesamt gehen die Tendenzen bei den drei Items jedoch eher in Richtung der einfachen statt vollkommenen Zustimmung.

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse, dass die Lernenden beider Erprobungen die allgemeine Struktur und Verständlichkeit der Lernmaterialien sehr positiv bewertet haben. Die Ergebnisse der einzelnen Items legen nahe, dass die Lernmate-

rialien übersichtlich gestaltet sind, eine gute Orientierung bieten und verständliche Aufgabenstellungen beinhalten.

Schwierigkeitsgrad (F3.2.2) Die Ergebnisse zum Schwierigkeitsgrad der Lernmaterialien sind in der Tabelle 10.8 dargestellt.

Tabelle 10.8

Antworthäufigkeiten zur Bewertung des Schwierigkeitsgrades der Lernmaterialien

Item	x	--	-	0	+	++
Schieberegler überfordernd	0	7	5	5	4	1
Aufgaben zu schwierig	1	2	5	9	5	2
Schreibaufwand gering	0	0	2	8	9	5

Anmerkung. x = Kann ich nicht sagen, -- = Ich stimme überhaupt nicht zu, - = Ich stimme nicht zu, 0 = Ich bin neutral, + = Ich stimme zu, ++ = Ich stimme völlig zu.

Hinsichtlich der Überforderung aufgrund der Schieberegler der Simulation zum Aufsteigen, Schweben und Sinken, ist eine eher breite Verteilung mit der Antworthäufigkeiten zu erkennen mit einer deutlichen Tendenz zur Nichtzustimmung. Bezüglich der Aufgabenschwierigkeit wird hingegen eine symmetrische, glockenförmige Verteilung der Antworthäufigkeiten um die neutrale Antwortkategorie ersichtlich. Die Mehrheit der Lernenden nahm eine neutrale Position ein, während es kaum extreme Meinungen gab. Die Verteilung der Antworthäufigkeiten zum geringen Schreibaufwand zeigt eine deutliche Tendenz zu positiven Bewertungen, mit Häufungen bei der neutralen Position und der einfachen Zustimmung.

Bei E2 zeigte sich bezüglich der Überforderung aufgrund der Schieberegler eher eine Tendenz zur neutralen Position (siehe Tabelle A.5.1). Zudem war die Anzahl der Zustimmungen und Nichtzustimmungen identisch. Weiterhin zeigte sich bei der Aufgabenschwierigkeit ebenfalls eine nahezu symmetrische, glockenförmige jedoch etwas spitzere Verteilung der Antworthäufigkeiten. Bezüglich des Schreibaufwands zeigte sich eine ähnliche Tendenz.

Insgesamt deuten die Ergebnisse darauf hin, dass die Lernenden in beiden Erprobungen den Schwierigkeitsgrad der Lernmaterialien weitestgehend als angemessen bewerten. Im Einzelnen zeigt sich bei den Schiebereglern der Simulation eine

Tendenz zur Nichtüberforderung bei E3 und eine Tendenz zur angemessenen Forderung bei E2. Dies deutet darauf hin, dass die Simulation das Kriterium des angemessenen Maßes an Interaktivität erfüllt.

Die glockenförmige Verteilung der Antworthäufigkeiten bei der Bewertung der Aufgabenschwierigkeit bei beiden Erprobungen deutet darauf hin, dass die Aufgabenschwierigkeit insgesamt gut auf das Niveau der Lernenden abgestimmt ist und die Aufgaben weder zu einfach noch zu schwer sind.

Bezüglich des Schreibaufwands zeigte sich, dass die Lernenden diesen als weitestgehend gering einschätzten. Dies lässt auf eine eher geringe sprachliche Belastung in den Aufgaben schließen.

Spaßfaktor (F3.2.3) Die Ergebnisse zum Spaßfaktor der Lernmaterialien sind in der Tabelle 10.9 dargestellt.

Tabelle 10.9

Antworthäufigkeiten zur Bewertung des Spaßfaktors bei Aufgaben, Simulationen und Experimenten

Item	x	--	-	0	+	++
Experimente	0	0	1	1.5	3.5	18
Simulation	0	0	1	3	9	9
Aufgaben	0	0	1	2	7.5	13.5

Anmerkung. x = Kann ich nicht sagen, -- = Ich stimme überhaupt nicht zu, - = Ich stimme nicht zu, 0 = Ich bin neutral, + = Ich stimme zu, ++ = Ich stimme völlig zu.

Es ist zu erkennen, dass bei allen drei Items nahezu alle Lernenden zustimmten oder vollkommen zustimmten. Bei den Experimenten ist eine starke Tendenz und bei den Aufgaben eine leichte Tendenz zur vollkommenen Zustimmung zu erkennen. Die Antworthäufigkeiten bei der Simulation zeigen eine Gleichverteilung zwischen einfacher und vollkommener Zustimmung.

Bei E2 zeigte sich hinsichtlich des Spaßfaktors insgesamt ebenfalls eine deutliche Tendenz in Richtung positiver Bewertungen (siehe Tabelle A.5.1). Die Aufgaben wurden jedoch mit einer Tendenz zur einfachen Zustimmung und die Simulationen mit einem erhöhten Anteil an neutralen Positionen etwas schlechter bewertet als bei E3.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse durchweg positive Bewertungen des Spaßfaktors bei den Lernaktivitäten. Dies zeigte sich nicht nur erwartungsgemäß bei den Experimenten, sondern auch bei den Aufgaben. Dies deutet darauf hin, dass die Art und Weise, wie die Aufgaben gestaltet sind, gut bei den Lernenden ankommt und sie als unterhaltsam empfunden werden. Auch die Simulationen wurden positiv bewertet, allerdings deutete sich im Vergleich zu den restlichen Aufgaben kein erhöhtes Wahrnehmungsvergnügen an.

Strukturierungselemente (F3.2.4) Die Ergebnisse zur Bewertung der Strukturierungselemente sind in der Tabelle 10.10 dargestellt.

Tabelle 10.10

Antworthäufigkeiten zur Bewertung der Strukturierungselemente

Item	x	--	-	0	+	++
Bebilderung der Versuche	0	1	1	4	5	13
Abhaken der Schritte	1	1	0	8	6	8
Tipps zur Simulation	1	0	2	4	10	7
Paararbeit	2	0	1	2	8.5	10.5
Plenumsdiskussionen	2	0	0	5	7	9
Aufgabenüberschrift	1	1	2	6	5	9

Anmerkung. x = Kann ich nicht sagen, -- = Ich stimme überhaupt nicht zu, - = Ich stimme nicht zu, 0 = Ich bin neutral, + = Ich stimme zu, ++ = Ich stimme völlig zu.

Es zeigt sich, dass bei allen Items der Großteil der Lernenden entweder zustimmte oder vollkommen zustimmte, wobei eine Tendenz zur vollständigen Zustimmung insbesondere bei der Bebilderung der Versuche zu beobachten ist. Lediglich bei den Tipps zur Simulation wurde häufiger einfach zugestimmt als vollkommen. Bei dem Abhaken der Versuchsschritte und den Aufgabenüberschriften wurden vergleichsweise häufig die neutrale oder ablehnende Position eingenommen.

Auch bei E2 lässt sich überwiegend eine Tendenz zur positiven Bewertung der Strukturierungselemente erkennen (siehe Tabelle A.5.1). Allerdings lässt sich beim Abhaken der Versuchsschritte, den Tipps zur Simulation und den Aufgabenüber-

schriften eine zu den anderen Items vergleichsweise hohe Anzahl an neutralen und ablehnenden Positionen beobachten.

Insgesamt werden die Strukturierungselemente überwiegend positiv bewertet. Somit scheinen diese die Lernenden bei der Bearbeitung der Lernmaterialien unterstützt und zum Lernprozess beigetragen zu haben. Dies scheint auf Basis der Ergebnisse insbesondere für die Bebilderung der Versuchsschritte, die häufige Paararbeit sowie die Besprechungen im Plenum der Fall gewesen zu sein. Das Abhaken der Versuchsschritte, die Tipps zur Simulation sowie die Aufgabenüberschriften scheinen aufgrund der vergleichsweise häufigen neutralen Positionen und Nichtzustimmungen nicht bei allen Lernenden unterstützend gewirkt zu haben.

Funktionsweise der Designelemente (F3.2.5) Die Ergebnisse zur Funktionsweise bestimmter Designelemente sind in der Tabelle 10.10 dargestellt.

Tabelle 10.11

Antworthäufigkeiten zur Bewertung der Funktion von Designelementen

Item	x	--	-	0	+	++
kogn. Konflikt (Experiment)	1	2	4	2	7	7
Relevanz von Inhalten (Merkzettel)	0	0	0	3	4	17
Überblick (Jahrmarktbild)	1	2	1	3	6	11
Orientierung (Jahrmarktbild)	0	2	2	2	6	12

Anmerkung. x = Kann ich nicht sagen, -- = Ich stimme überhaupt nicht zu, - = Ich stimme nicht zu, 0 = Ich bin neutral, + = Ich stimme zu, ++ = Ich stimme völlig zu.

Es ist zu erkennen, dass bei allen Items der Großteil der Lernenden entweder zustimmte oder vollkommen zustimmte, wobei eine Tendenz zur vollständigen Zustimmung insbesondere bei dem Item zum Merkzettel zu beobachten ist.

Bei E2 zeigte sich ebenfalls bei allen Items, dass der Großteil der Lernenden zustimmte oder vollkommen zustimmte, wobei eher eine Tendenz zur einfachen Zustimmung zu beobachten ist (siehe Tabelle A.5.1). Vergleichsweise erhöhte Nichtzustimmungen hinsichtlich des kognitiven Konflikts konnten im Gegensatz zu E3 nicht beobachtet werden.

Insgesamt wurden die Funktionsweisen der ausgewählten Designelemente weitestgehend positiv bewertet. Dies kann als ein Hinweis dafür interpretiert werden, dass diese Designelemente wie intendiert wirken. Dies scheint auf Basis der Ergebnisse insbesondere für das Hervorheben wichtiger Inhalte durch den Merktzettel sowie das Gewähren eines Überblicks über die Grundvorstellung und einer Orientierung für den Stundenverlauf durch das Jahrmarktbild der Fall gewesen zu sein.

Weiterhin scheint bei dem Großteil der Lernenden ein kognitiver Konflikt bei dem Schokoriegelexperiment ausgelöst worden zu sein, da die Lernenden das Sinken des kleinen und leichten Stück Bountys überwiegend als überraschend empfanden.

Evaluation der Grundvorstellungen (F3.2.6) Die Ergebnisse zur Evaluation der Grundvorstellungen sind in der Tabelle 10.10 dargestellt.

Tabelle 10.12

Antworthäufigkeiten zur Bewertung der Verständlichkeit und Nützlichkeit der Würfel- und Auftriebsvorstellung

Item	x	--	-	o	+	++
Vorstellbarkeit (Würfelvorst.)	0	1	1	4	7	9
Verständlichkeit (Würfelvorst.)	1	0	0.5	6.5	6	10
Nutzen (Würfelvorst.)	0	0	0	3.5	7.5	11
Verständlichkeit (Auftriebsvorst.)	1	0	1	4	8	9
Nutzen (Auftriebsvorst.)	2	0	1	4	7	10

Anmerkung. x = Kann ich nicht sagen, -- = Ich stimme überhaupt nicht zu, - = Ich stimme nicht zu, o = Ich bin neutral, + = Ich stimme zu, ++ = Ich stimme völlig zu.

Es zeigt sich eine sehr ähnliche Verteilung der Antworthäufigkeiten bei allen Items mit einem Großteil an Zustimmungen oder vollkommenen Zustimmungen sowie einer leichten Tendenz zur vollkommenen Zustimmung.

Bei E2 zeigte sich hinsichtlich der Verständlichkeit der Würfel- und Auftriebsvorstellung sowie dem Nutzen der Würfelvorstellung eine deutliche Tendenz zur einfachen Zustimmung (siehe Tabelle A.5.1). Hinsichtlich der Vorstellbarkeit der Würfel-

vorstellung zeigte sich jedoch eine ähnlich häufige Anzahl an Nichtzustimmungen (6) wie Zustimmungen (8).

Insgesamt wurden die Verständlichkeit und die Nützlichkeit der Würfel- und Auftriebsvorstellung weitestgehend positiv bewertet. Dies kann als Hinweis darauf interpretiert werden, dass zum einen sowohl die gewählten Bezeichnungen als auch die Bedeutung der Grundvorstellungen für die Lernenden verständlich waren und zum anderen der Nutzen der Grundvorstellungen den Lernenden bewusst geworden ist.

Weiterhin deuten die Ergebnisse zur Vorstellbarkeit der Würfelvorstellung an, dass sich die meisten Lernenden sich die Dichte als Masse eines Kubikzentimeterwürfels vorstellen können, dies jedoch für einige Lernende aus E2 schwierig war. Eine stärkere Einbindung enaktiver Darstellungsformen, wie sie bereits in Abschnitt 10.2 durch die Ergänzung einer enaktiven Aufgabe vorgeschlagen wurde, könnte für diese Lernenden eine wertvolle Unterstützung sein, um ihre Vorstellungskraft durch das konkrete Wahrnehmen der Masse eines Kubikzentimeterwürfels zu fördern.

Positive und verbesserungswürdige Aspekte (F3.2.7) In Abbildung 10.16 sind die positiven und verbesserungswürdigen Aspekte der Unterrichtskonzeption aus der Sicht der Lernenden dargestellt.

Anhand der Codewolken lässt sich erkennen, dass bei E3 am häufigsten die Experimente und am zweithäufigsten die Aufgaben als positive Aspekte genannt wurden. Vereinzelt wurde auch die Paararbeit, die Arbeit mit den iPads und die Web-App genannt. Hinsichtlich der verbesserungswürdigen Aspekte gaben die Lernenden am häufigsten an, dass „nichts“ verbessert werden sollte. Am zweithäufigsten wurde eine Reduktion der Arbeitsblätter gefordert.

Auch bei E2 stellen die Experimente den am häufigsten genannten positiven Aspekt dar. Weiterhin wurden ebenfalls die Paararbeit und die Arbeit mit den iPads genannt. Im Gegensatz zu E3 wurden allerdings nicht die Aufgaben, dafür aber der geringe Schreibaufwand und der Lernzuwachs positiv angemerkt. Beispielsweise merkten die Lernenden positiv an, dass sie „nicht so viel schreiben mussten und viel gelernt haben“ (S6_E2_Frag) oder „gelernt haben warum etwas aufsteigt oder etwas nicht“ (S9_E2_Frag).

Weiterhin zeigte sich auch bei E2, dass die Lernenden häufig nichts verbessern oder die Arbeitsblattanzahl reduzieren würden. Am häufigsten wurde jedoch der

Abbildung 10.16

Überblick über positive und verbesserungswürdige Aspekte der Unterrichtskonzeption mit begleitenden Lernmaterialien aus Sicht der Lernenden



Anmerkung. Die Größe der Wörter ist proportional zur Häufigkeit der genannten Aspekte. Fehlende Antworten und Aspekte, die nicht in direktem Zusammenhang mit der Unterrichtskonzeption stehen (z. B. Verpflegung oder Kameras), wurden in der Abbildung nicht berücksichtigt. Die Gesamtanzahl der berücksichtigten Aspekte beträgt 21 bei (a), 9 bei (b), 34 bei (c) und 15 bei (d).

Wunsch nach mehr Zeit für die Bearbeitung der Aufgaben geäußert. Eine Person sieht auch die Schwierigkeit der Arbeitsblätter als verbesserungswürdig an.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass den Lernende insbesondere die Experimente jedoch teils auch weitere Aspekte wie etwa die Paararbeit, die Aufgaben oder den geringen Schreibaufwand besonders gut gefallen haben. Dies unterstreicht die positiven Ergebnisse der entsprechenden geschlossenen Items.

Das größte Verbesserungspotenzial sehen die Lernenden in der Reduktion der Arbeitsblätteranzahl. Diese Rückmeldung ist verständlich, aber schwer umzusetzen, da dadurch entweder unterstützende Elemente wie Lückentexte oder Darstellungen wegfallen würden oder die Inhalte zu Lasten der Übersichtlichkeit stärker komprimiert dargestellt werden müssten. Beide Ansätze sind aus didaktischer Sicht kritisch zu bewerten und widersprechen den bisherigen positiven Rückmeldungen der Lernenden zur Übersichtlichkeit und den Unterstützungsmaßnahmen. Statt-

dessen könnte eine digitale Bearbeitung der Materialien in Betracht gezogen werden, um den physischen Umfang zu verringern, ohne didaktische Änderungen vorzunehmen.

Bei E2 wurde am häufigsten der Wunsch nach mehr Zeit für die Bearbeitung der Aufgaben geäußert. Dies deutet darauf hin, dass die Lernenden trotz der im Vergleich zu E3 deutlich längeren Bearbeitungszeit weiterhin mehr Zeit für die Bearbeitung der Aufgaben benötigt hätten.

10.3.3 Zusammenfassung und Fazit

In diesem Abschnitt wurde untersucht, wie die Lernenden die Unterrichtskonzeption *maGic* bewerten. Basierend auf den Ergebnissen der Fragebögen wurden dabei mehrere zentrale Erkenntnisse gewonnen:

Die Lernmaterialien wurden überwiegend als gut strukturiert und die Aufgabenstellungen als klar formuliert wahrgenommen.

Der Schwierigkeitsgrad der Aufgaben wurde von den meisten Lernenden als angemessen empfunden und schien somit gut an das Niveau der Lernenden angepasst zu sein. Weiterhin deutete sich ein angemessenes Maß an Interaktivität in der Simulation an und die sprachliche Belastung scheint aufgrund des geringen eingeschätzten Schreibaufwands niedrig zu sein.

Die positive Bewertung des Spaßfaktors unterstreicht, dass die Aufgaben, Simulationen und insbesondere die Experimente als unterhaltsam wahrgenommen wurden.

Strukturierungselemente wie die Bebilderung der Versuchsschritte, die häufige Partnerarbeit und die Besprechungen im Plenum wurden grundsätzlich als hilfreich bewertet, während das Abhaken der Versuchsschritte sowie die Tipps zur Simulation etwas weniger positiv gesehen wurden.

Hinsichtlich der Funktionsweise der Designelemente, wie dem Hervorheben wichtiger Inhalte durch den Merktzettel oder der Überblicks- und Orientierungsfunktion des Jahrmarktbildes, zeigten sich weitestgehend positive Bewertungen. Dies weist darauf hin, dass die Elemente wie intendiert funktionieren. Auch scheint bei einem Großteil der Lernenden durch das Schokoriegelexperiment ein kognitiver Konflikt erfolgreich ausgelöst worden zu sein.

Die Würfel- und Auftriebsvorstellungen wurden als verständlich und nützlich evaluiert. Dennoch haben einige Lernende Schwierigkeiten mit der Vorstellbarkeit der Würfelvorstellung erlebt, was möglicherweise durch eine stärkere Integration enaktiver Darstellungsformen (wie bereits in Abschnitt 10.2 durch die Ergänzung einer enaktiven Aufgabe vorgeschlagen wurde) verbessert werden könnte.

Besonders gut gefielen den Lernenden die Experimente, aber auch Aspekte wie etwa die Paararbeit oder die Aufgaben wurden genannt, was die Ergebnisse der geschlossenen Items unterstreicht. Verbesserungspotenzial sahen die Lernenden insbesondere in der Reduktion der Arbeitsblattanzahl und bei E2 wurde häufig der Wunsch nach einer längeren Bearbeitungszeit für die Aufgaben geäußert.

Insgesamt lässt sich in Bezug auf die übergeordnete Forschungsfrage (*F3.2*) zusammenfassen, dass die Unterrichtskonzeption mit den begleitenden Lernmaterialien von den Lernenden sehr positiv bewertet wurde. Dies kann als ein Hinweis darauf interpretiert werden, dass die Unterrichtskonzeption mit den begleitenden Lernmaterialien weitestgehend wie intendiert funktioniert.

10.4 Lernzuwachs Prä-Post-Test

F3.3 Inwiefern initiiert die Intervention (langfristige) Vorstellungsentwicklungen von individuellen Vorstellungen hin zu den normativ formulierten Grundvorstellungen?

F3.3.1 Inwieweit lässt sich ein Lernzuwachs bei der Bearbeitung vorstellungsorientierter Aufgaben zur Dichte vor und nach der Intervention feststellen?

F3.3.2 Inwiefern vermuten und begründen die Lernenden vor und nach der Intervention den Auftrieb von Stoffen und Objekten in flüssigen Stoffen korrekt?

F3.3.3 Inwiefern begründen die Lernenden vor und nach der Intervention den Auftrieb von Stoffen und Objekten in gasförmigen Stoffen korrekt?

F3.3.4 Inwiefern begründen die Lernenden vor und nach der Intervention den Auftrieb von Stoffen und Objekten in flüssigen und gasförmigen Stoffen identisch?

F3.3.5 Inwiefern nennen die Lernenden vor und nach der Intervention Aspekte der Auftriebsvorstellung und um welche handelt es sich dabei?

F3.3.6 Inwiefern interpretieren die Lernenden vor und nach der Intervention eine Dichteangabe mithilfe der Auftriebsvorstellung?

F3.3.7 Inwiefern erkennen und begründen die Lernenden vor und nach der Intervention die Unabhängigkeit der Dichte von der Menge eines Stoffes?

F3.3.8 Inwiefern nennen die Lernenden vor und nach der Intervention Aspekte der Würfelvorstellung und um welche handelt es sich dabei?

F3.3.9 Inwiefern interpretieren die Lernenden vor und nach der Intervention eine Dichteangabe mithilfe der Würfelvorstellung?

10.4.1 Methodik

Die Erhebung von Vorstellungsentwicklungen erfolgte mithilfe von Tests in einem Prä-Post-Design. Im Rahmen der Erprobung E3 wurde zudem ein Follow-up-Test durchgeführt.

Aufbau des Tests Die Tests bestanden insgesamt aus fünf Items. Hier wurden bewusst offene Items gewählt, um möglichst individuelle Vorstellungen erheben zu können. Zudem wurden sowohl Items gewählt, die eine bestimmte Grundvorstellung ansprechen, als auch Items, die mit mehreren Grundvorstellungen beantwortet werden können, um auch ggf. individuelle Präferenzen gegenüber bestimmten Grundvorstellungen ermitteln zu können. Die Items sind inhaltsgleich mit einigen der verwendeten Aufgaben im Rahmen der Lernendeninterviews, die mit engem Bezug zu den Ergebnissen der Literatur- und Schulbuchanalyse entwickelt wurden (siehe Abschnitt 8.5). Im Gegensatz zu den Interviews wurde jedoch aus zeitökonomischen Gründen und zur Verhinderung einer Überforderung der Lernenden nicht zu jeder Facette der Würfelvorstellung ein Item formuliert. Stattdessen wurde sich auf die Facette *Stoffeigenschaft* beschränkt, da das entsprechende Item dazu in vergleichbarer Form in anderen Untersuchungen verwendet wurde (z. B. Yeend et al., 2001) und sich in den Lernendeninterviews als erfolgreich zur Identifikation der Würfelvorstellung erwiesen hat.

Um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, wurden identische Items in den Prä- und Post-Tests verwendet. Im Follow-up-Test wurden einige Items jedoch leicht variiert, um Übungseffekten durch mehrfaches Testen entgegenzuwirken. Ein Überblick über die verwendeten Items in den Tests und die dadurch jeweils angesprochenen Facetten und Grundvorstellungen sind in Tabelle 10.13 dargestellt. Das vollständige Testinstrument ist exemplarisch für den Prä-Post-Test im Anhang D.2 zu finden.

Tabelle 10.13

Übersicht über die Items der Prä-, Post- und Follow-up-Tests

Facetten und Grundvorstellungen	Item Prä- und Post-Test	Änderungen Follow-up-Test
Auftrieb in flüssigen Stoffen (AV)	1) Bildimpuls mit einem Holzwürfel ($m = 0,675 \text{ g}$, $V = 1 \text{ cm}^3$) und einem Aluminiumwürfel ($m = 2,7 \text{ g}$, $V = 1 \text{ cm}^3$). Welcher der Würfel schwimmt in Wasser? Kreuze an und begründe deine Vermutung!	Austausch der Stoffe Holz und Aluminium gegen die Stoffe Gold und Gummi
Auftrieb in gasförmigen Stoffen (AV)	2) Ein mit Wasserstoff gefüllter Ballon steigt in der Luft nach oben. Wie erklärst du dir diese Beobachtung? Schreibe auf!	Austausch des aufsteigenden Wasserstoffballons durch einen sinkenden Kohlenstoffdioxidballon
Allgemeines Dichteverständnis (WV & AV)	3) Hast du schon mal den Begriff „Dichte“ gehört? Schreibe alles auf, was du über die Dichte weißt!	—
Invarianz der Dichte gegenüber der Stoffmenge (WV)	4) Austausch der unterschiedlich großen Eisenstücke durch einen abgeschnittenen Kupferdraht	
Interpretation von Dichteangaben (WV & AV)	5) Die Dichte von Schwefel beträgt $2 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$. Was bedeutet dieser Wert für dich? Schreibe auf!	Austausch der Dichte von Schwefel durch die Dichte von Natrium ($0,97 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$)

Anmerkung. AV = Auftriebsvorstellung, WV = Würfelvorstellung.

Datenauswertung Zunächst wurden die Tests ($N = 211$) aus allen vier Erprobungsphasen (E0, E1, E2, E3) digitalisiert, indem die Antworten der Lernenden für jedes Item in eine Excel-Tabelle übertragen wurden. Anschließend wurden alle Tests ausgeschlossen, bei denen entweder der Prä- oder Post-Test fehlte. Daraus resultierte eine Reduktion der Datensätze von 211 auf 196 und der Anzahl der Teilnehmenden von 103 auf 86.

Die erstellte Excel-Tabelle wurde in die Software MAXQDA importiert, um die Daten mittels QIA auszuwerten. Die Bildung der Kategorien erfolgte induktiv. Anhand des entwickelten Codierleitfadens wurden die Daten von einem zweiten Codierer in drei Schritten codiert:

- *Erster Schritt:* Der Zweitcodierer codierte etwa 11 % der Daten. Um einen möglichst repräsentativen Datensatz für den ersten Codierprozess auszuwählen, wurden die codierten Tests mithilfe der Dokumentenlandkarte von MAXQDA in sechs Cluster eingeteilt, die sich hinsichtlich der Codierungen voneinander unterscheiden. Aus jedem dieser Cluster wurden dann zufällig 11 % der Tests ausgewählt.
- *Zweiter Schritt:* Weitere 43 % der Daten wurden kodiert, wobei in jeder Erprobung jeweils die Tests der ersten Hälfte der Teilnehmenden ausgewählt wurden.
- *Dritter Schritt:* Die verbleibenden 46 % der Daten wurden kodiert.

Nach jedem Schritt wurde die Inter-coder-Reliabilität nach Brennan und Prediger (1981) für jedes Item und auf verschiedenen Codeebenen einzeln bestimmt (siehe Anhang A.6). Einige Codes, wie z. B. *keine Antwort*, wurden aufgrund ihres simplen Charakters von der Berechnung ausgeschlossen.

Bei Nicht-Übereinstimmungen in den ersten beiden Schritten wurde im Sinne des konsensuellen Codierens eine gemeinsame Codierung in Diskussionen zwischen den beiden Codierenden vereinbart (siehe Anhang F) und ggf. der Codierleitfaden angepasst. Der finale Codierleitfaden mit Kennzeichnung der vorgenommenen Änderungen ist dem Anhang C.4 zu entnehmen. Nach dem letzten Schritt wurden die ursprünglichen Codierungen beibehalten, da die Kappa-Werte überwiegend (ca. .80) als zufriedenstellend (substantielle Übereinstimmung nach Landis & Koch, 1977) betrachtet wurden. Lediglich bei zwei Codeebenen lagen die Werte unter-

halb von .80. Dies ist auf die geringe Anzahl der codierten Segmente zurückzuführen. Dennoch wurden in diesen Fällen die Codierungen konsensuell diskutiert. Eine detaillierte Übersicht über die Codehäufigkeiten ist im Anhang F zu finden. Ein exemplarischer Einblick in die entwickelten Kategorien ist in Tabelle 10.14 dargestellt.

Tabelle 10.14

Übersicht der Haupt- und Subcodes für die Kodierung der Prä-, Post- und Follow-up-Tests

Item	Hauptcode	Subcodes	Beispiel
1	Antwort	richtiger Würfel, falscher Würfel , beide Würfel	X Aluminiumwürfel Begründung: Da das Aluminium dichter ist. (S2_E3_Post)
	Begründung	mit Dichte (r, u, f), mit Masse, mit Stoff	
	Relation	keine, unkonkret , zum umliegenden Stoff	
2	Begründung	mit Dichte (r, u, f), mit Masse, mit Stoff	Weil die dichte geringer ist als die der Luft. Der Ballon ist mit Helium gefüllt. (S6_E3_Post)
	Relation	keine, unkonkret, zum umliegenden Stoff	

Item	Hauptcode	Subcodes	Beispiel
3	Relation zu m und V	Masse pro cm^3 -Würfel (r, u), Masse, Masse und Volumen	Die Dichte beschreibt die Masse und das Volumen des Gegenstandes. (S6_E0_Post)
	Stoffeigenschaft	—	Materialien können unterschiedliche Dichten haben. Materialien mit hoher Dichte treiben z. B. oben. (S4_E3_Prä)
	Auftrieb	r, f	
	Formeln und Symbole	r, u, f	M (Masse)/V (Volumen), dass ist der Rechenweg der Dichte. Wird in (Zeichen für rho) von angegeben. (S4_E0_Post)
	alternative Vorstellungen	Undurchlässigkeit , Teilchennähe, Festigkeit	Dichte ist wenn etwas dicht ist, wie z. B. wasserdicht. (also kein Wasser kommt durch) (S13_E3_Prä)
4	Antwort	Dichte ist gleich , Dichte unterscheidet sich	Sie unterscheidet sich nicht, da die Masse pro cm^3 gleich bleibt. (S18_E3_Post)
	Begründung	Masse pro cm^3 , Stoff, Masse	
5	Relation zu m und V	Masse pro cm^3 (r, u, f), Masse oder Volumen, Masse pro cm^3 -Würfel (r, u)	Natrium schwimmt im Wasser und fliegt in der Luft. Außerdem wiegt ein cm^3 0,97 g. (S3_E3_Follow)
	Auftrieb	in Wasser, in Luft (r, f)	
	Rechnung	r, u, f	Der wert is gramm geteilt durch Kubikzentimeter (S21_E1_Post)

Anmerkung. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind nicht alle Codes und Codebezeichnungen vollständig dargestellt. Fettgedruckte (Sub-)Codes entsprechen den Kodierungen im jeweiligen Beispiel. r = richtig, u = ungenau, f = falsch/falscher Zusammenhang.

Neben der detaillierten qualitativen Analyse der Antworten wurde zusätzlich eine auf den Codes basierende quantitative Auswertung vorgenommen. Diese dient in erster Linie der unterstützenden Visualisierung und ersten quantitativen Einschätzung der Vorstellungsentwicklungen und erhebt nicht den Anspruch auf eine generalisierbare Wirksamkeitsmessung.

Die statistische Auswertung erfolgte ausschließlich für die Erprobungen E2 und E3, da hier die aktuelle Version der Lernmaterialien eingesetzt wurde. Teilnehmende von E2, die nur an einem der beiden Erhebungstermine teilnahmen, wurden hierbei ausgeschlossen. Für die Entwicklung des Kategoriensystems wurden diese Fälle jedoch noch mit einbezogen, um ein möglichst vollständiges Bild der durch die Intervention ausgelösten Vorstellungsentwicklungen zu erhalten. Insgesamt gingen damit die Datensätze von 18 Teilnehmenden aus E2 und 24 aus E3 in die statistische Analyse ein.

Zur Quantifizierung der Daten wurden jedem Code Punkte zugeordnet (0 für *falsch*, 0,5 für *teilweise richtig* und 1 Punkt für *richtig*). Die vergebenen Punkte können dem im Anhang C.4 beigefügten Codierleitfaden entnommen werden.

Die Punkte wurden je Item summiert und eine Gesamtsumme berechnet, wofür die Variablen-Berechnungsfunktionen in MAXQDA-Stats verwendet wurden. Die Testergebnisse sind im Anhang F zu finden. Die resultierenden Daten wurden für die statistische Auswertung in SPSS importiert.

Für die ordinalskalierten Punktedaten wurden bei E2 der Wilcoxon-Test und bei E3 (mit zusätzlichem Follow-up-Test) der Friedman-Test verwendet. Die anschließenden paarweisen Vergleiche erfolgten mit dem Conover-Post-hoc-Test, gefolgt von einer Bonferroni-Korrektur. Diese Vorgehensweise dient dazu, zunächst potenziell relevante Unterschiede sensitiv zu identifizieren und anschließend das Risiko für falsch-positive Ergebnisse zu minimieren. Alle Tests wurden zweiseitig durchgeführt.

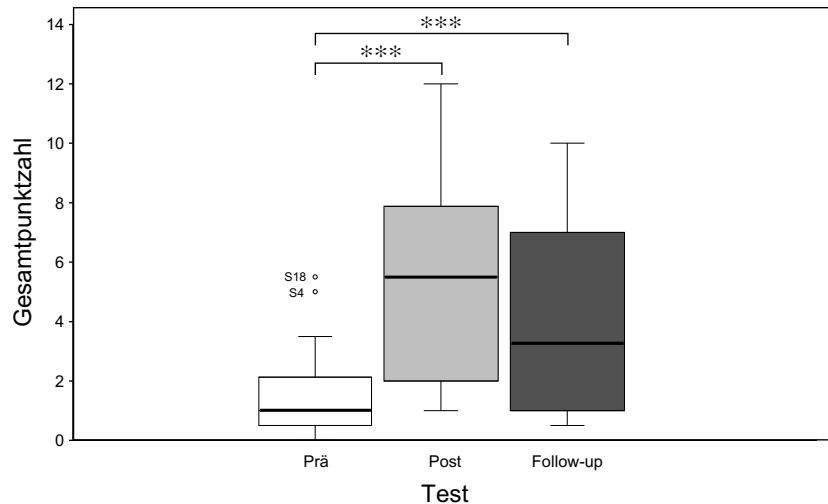
Zur Nachvollziehbarkeit der Berechnungen wurden die entsprechenden Output-Dateien der statistischen Analysen im Anhang F beigefügt.

10.4.2 Ergebnisse

Lernzuwachs (F3.3.1) Die Ergebnisse hinsichtlich der Gesamtpunktzahl der Tests sind in Abbildung 10.17 dargestellt.

Abbildung 10.17

Vergleich der Gesamtpunktzahl von Prä-, Post- und Follow-up-Test



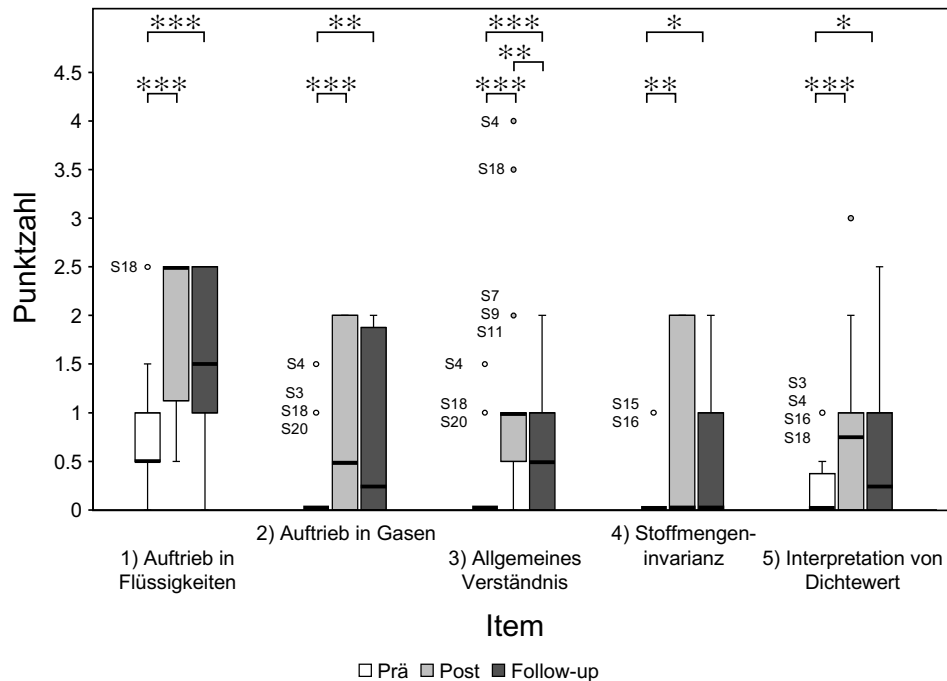
Anmerkung. Signifikanzniveaus basieren auf den Bonferroni-korrigierten p -Werten des Conover-Tests (Post-hoc nach signifikantem Friedman-Test). *** $p_{\text{angepasst}} < .001$.

Der Friedman-Test zeigte, dass sich die Gesamtpunktzahlen zwischen den drei Messzeitpunkten signifikant unterschieden, $\chi^2(2) = 27.40$, $p < .001$. Post-hoc-Vergleiche nach Conover mit Bonferroni-Korrektur zeigten signifikante Unterschiede zwischen Prä-Test ($Mdn = 1.00$) und Post-Test ($Mdn = 5.25$), $t(46) = 7.65$, $p_{\text{angepasst}} < .001$, sowie zwischen Prä- und Follow-up-Test ($Mdn = 3.00$), $t(46) = 5.22$, $p_{\text{angepasst}} < .001$. In der Abbildung lässt sich zudem eine Abnahme der Gesamtpunktzahl von Post- zu Follow-up-Test erkennen; dieser Unterschied war allerdings nicht signifikant, $t(46) = 2.44$, $p_{\text{angepasst}} = .056$.

Die Ergebnisse der itemspezifischen Analysen sind in Abbildung 10.18 dargestellt. Der Friedman-Test zeigte signifikante Unterschiede zwischen den drei Messzeitpunkten für jedes der fünf Items (alle $p < .05$). Die nachfolgenden paarweisen Post-hoc-Tests (Conover-Test) mit Bonferroni-Korrektur zeigten, dass die Unterschiede zwischen den Prä- und Post-Tests bei allen Items signifikant waren, ebenso wie die Unterschiede zwischen den Prä- und Follow-up-Tests. Auffällig war, dass der Median bei Item 4 zu allen drei Testzeitpunkten 0 betrug. Bei allen Items ließ sich eine Abnahme der Punktzahl vom Post- zum Follow-up-Test beobachten; diese war jedoch lediglich bei Item 3 signifikant. Die detaillierten Ergebnisse der statistischen Tests sind in Tabelle A.7.2 im Anhang A.7 dargestellt.

Abbildung 10.18

Vergleich der itemspezifischen Ergebnisse von Prä-, Post- und Follow-up-Test



Anmerkung. Die maximal erreichbare Punktzahl beträgt für Item 1: 2,5; Item 2: 2; Item 4: 2 Punkte. Für die Items 3 und 5 war die Maximalpunktzahl nicht festgelegt; es wurden allerdings maximal 4 (Item 3) bzw. 3 (Item 5) Punkte in den Erprobungen erreicht. Signifikanzniveaus basieren auf den Bonferroni-korrigierten p-Werten des Conover-Tests (Post-hoc nach signifikantem Friedman-Test). * $p_{\text{angepasst}} < .05$. ** $p_{\text{angepasst}} < .01$. *** $p_{\text{angepasst}} < .001$.

Vergleich zu E2 Auch bei E2 konnte eine Zunahme der Gesamtpunktzahl von Prä- ($Mdn = 1.00$) zu Post-Test ($Mdn = 2.00$) identifiziert werden, die jedoch im Vergleich zu E3 deutlich geringer ausfiel. Dennoch ergab der Wilcoxon-Test, dass die Zunahme signifikant war ($z = -3.046, p = .001$).

Zudem konnte auch bei E2 bei allen Items eine Verbesserung von Prä- zu Post-Test festgestellt werden. Im Gegensatz zu E3 waren diese allerdings lediglich für Item 1 ($z = -2.698, p = .006$), Item 2 ($z = -2.588, p = .008$) und Item 4 ($z = -2.449, p = .031$) signifikant.

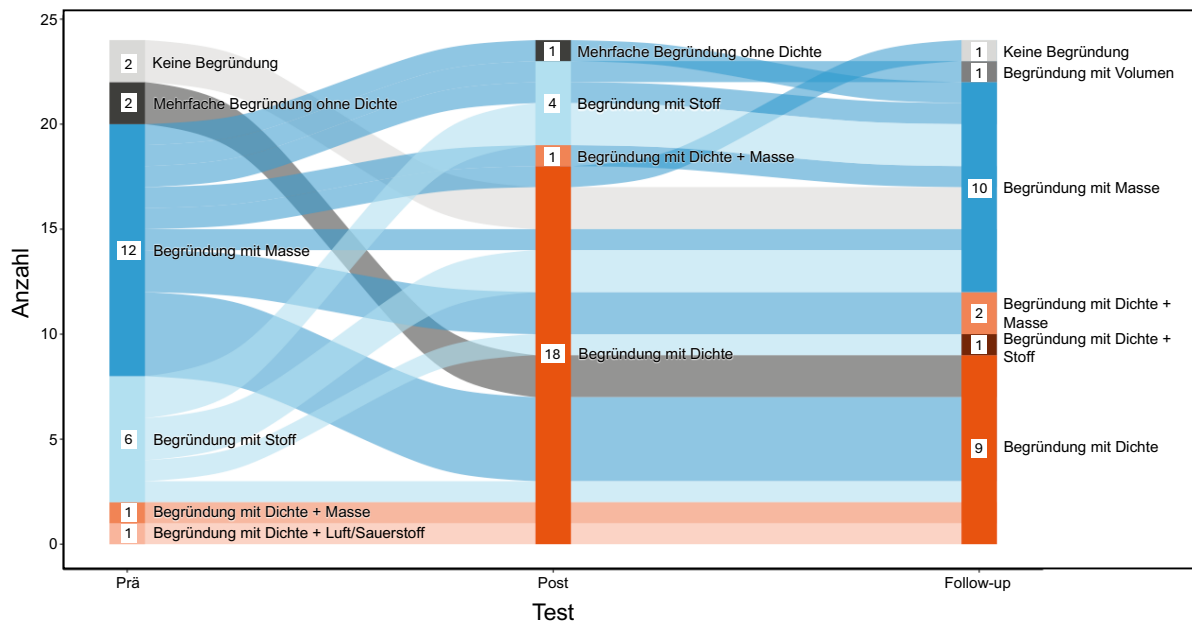
Die detaillierten Ergebnisse der statistischen Tests sowie weiterführende Diagramme zur Visualisierung der Ergebnisse sind im Anhang A.7.2 zu finden.

Auftrieb in Flüssigkeiten (Item 1, F3.3.2) Hinsichtlich der Antworten, welcher der beiden Würfel im Wasser schwimmt, zeigten sich zwischen den drei Testzeitpunkten nur geringe Unterschiede. Von den 24 Lernenden entschieden sich im Prä-Test 19, im Post-Test 22 und im Follow-up-Test 23 Lernende korrekt für das Schwimmen des Holz- bzw. des Gummiwürfels.

Bei den angeführten Begründungen zeigten sich hingegen deutliche Unterschiede. Der Abbildung 10.19 lässt sich entnehmen, dass die Mehrheit der Lernenden im Prä-Test das Schwimmen und Sinken der Würfel mit deren Masse begründete.

Abbildung 10.19

Vergleich der Begründungen für den Auftrieb in Flüssigkeiten (Item 1)



Am zweithäufigsten wurde der Stoff der Würfel als Grund angeführt. Eine Beispielantwort, die beide Begründungen enthält, ist die Folgende: „Ich glaube, dass der Holzwürfel schwimmt, weil er nur 0,675 g. Außerdem ist Holz an sich ‚schwimmfähig‘. Das sieht man auch z. B. Treibholz. Ich glaube dass der Aluminiumwürfel nicht schwimmen kann“ (S11_E3_Prä).

Im Post-Test begründete die Mehrheit der Lernenden das Schwimmen und Sinken mit der Dichte, während kaum noch die Masse als Grund angegeben wurde. Vom

Post-Test zum Follow-up-Test nahm die Anzahl der Begründungen mit der Dichte ab, während die Anzahl der Begründungen mit der Masse deutlich zunahm.

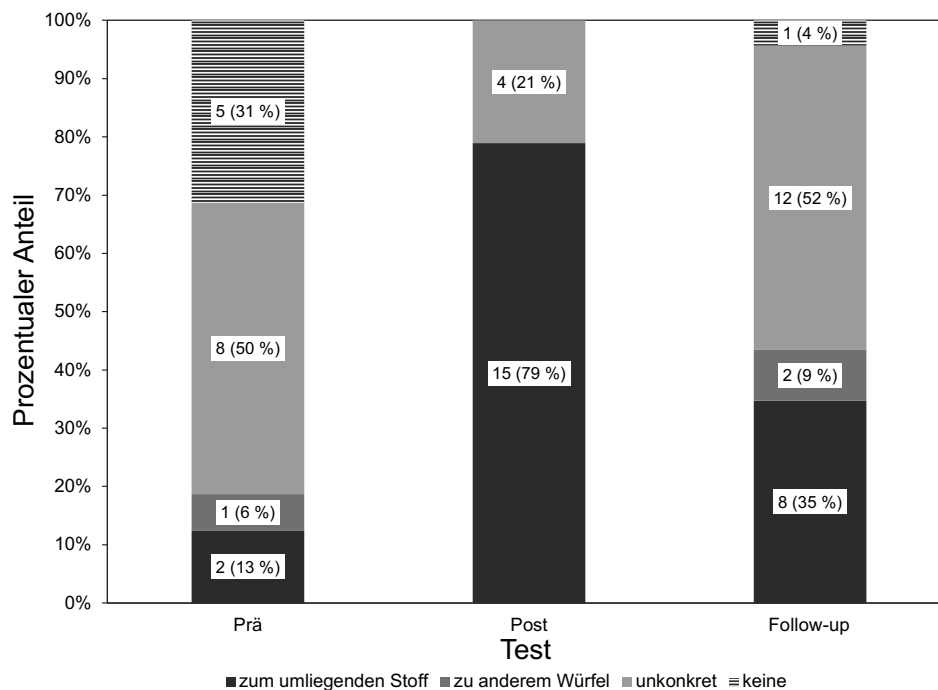
Hinsichtlich der Begründungsverläufe in Abbildung 10.19 lässt sich erkennen, dass mehrere Lernende, die im Post-Test, jedoch nicht im Follow-up-Test, mit der Dichte argumentierten, entweder auf ihre Argumentationsweise im Prä-Test zurückfielen oder diese mit der Dichte kombinierten. Letzteres verdeutlicht folgende Follow-up-Test-Antwort, die eine Kombination aus der Begründung mit der Dichte und der zuvor im Prä-Test angegebenen Begründung mit dem Stoff darstellt: „Ich glaube der Gummiwürfel, weil Gummi schwimmt. Oder weil die Dichte des Goldwürfels kleiner ist als bei dem Gummiwürfel“ (S9_E3_Follow: 1-2). Gleichzeitig wird in dem Beispiel deutlich, dass die Person fehlerhaft mit der Dichte argumentierte. Dies konnte jedoch lediglich bei einer weiteren Person im Post-Test festgestellt werden. Es ist auffällig, dass im Gegensatz zum Prä- und Post-Test im Follow-up-Test nahezu keine Argumentation mit dem Stoff erfolgte. Demnach argumentierte die Mehrheit der Lernenden, die im Prä-Test mit dem Stoff argumentierten, im Follow-up-Test mit der Masse statt mit dem Stoff.

Bei den Begründungen mit der Masse, dem Volumen und der Dichte wurde zudem codiert, inwieweit die Lernenden eine Relation zum umliegenden Stoff herstellen, da dies für die Vorhersage des Auftriebs essentiell ist. Die Ergebnisse dazu sind in Abbildung 10.20 dargestellt.

Aus den Ergebnissen geht hervor, dass im Prä-Test bei fast einem Drittel der Begründungen keine Relation angegeben wurden, während im Post-Test alle und im Follow-up-Test nahezu alle Begründungen eine Relation enthielten. Die Mehrheit der angegebenen Relationen im Prä- und Follow-up-Test war unkonkret, wie die folgende Beispielantwort verdeutlicht: „Ich denke Holz schwimmt, da es leichter ist“ (S7_E3_Prä). Der Komparativ „leichter“ deutet in diesem Fall eine Relation an. Es bleibt jedoch unklar, ob „leichter als der umliegende Stoff“ oder „leichter als der andere Würfel“ gemeint ist. Im Post-Test wurde bei 79 % der Begründungen eine Relation zum umliegenden Stoff angegeben. Dieser Anteil reduzierte sich im Follow-up-Test auf 35 %. Die Mehrheit der Begründungen im Follow-up-Test enthielt eine unkonkrete Relation. Eine genauere Analyse ergab, dass nur 4 der 12 Begründungen mit unkonkreter Relation in Kombination mit der Dichte auftraten.

Abbildung 10.20

Vergleich der hergestellten Relationen zum umliegenden Stoff für den Auftrieb in Flüssigkeiten

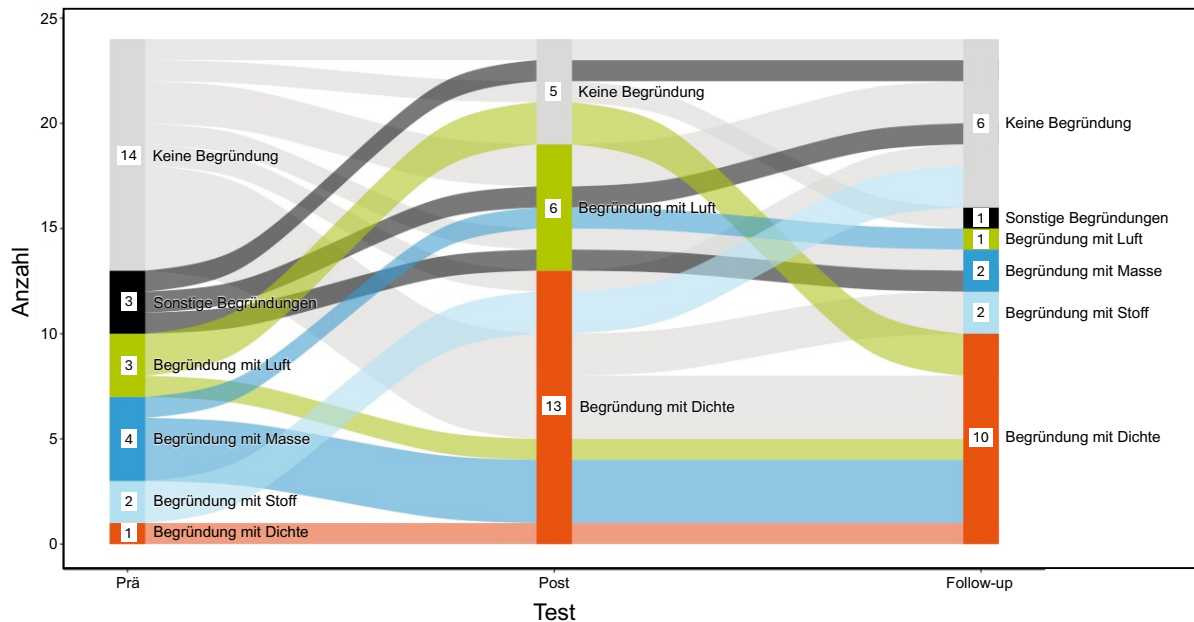


Vergleich zu E2 Bei E2 zeigten sich ähnliche Tendenzen wie bei E3. So entschied sich in Prä- und Post-Test mit 15 bzw. 13 von 18 Lernenden ebenfalls der Großteil der Lernenden korrekt für das Schwimmen des Holzwürfels.

Ebenso begründeten im Prä-Test 16 Lernende das Schwimmverhalten mit der Masse, während im Post-Test mit 12 Lernenden die Mehrheit mit der Dichte argumentierte. Lediglich eine Zunahme von Begründungen mit Relation zum umliegenden Stoff konnte im Gegensatz zu E3 nicht beobachtet werden. Stattdessen zeigte sich nahezu keine Veränderung zwischen Prä- und Post-Test hinsichtlich der Relationen. Beispielsweise gaben im Prä-Test 14 Lernende eine unkonkrete Relation oder eine Relation zum anderen Würfel an und im Post-Test 13.

Auftrieb in Gasen (Item 2, F3.3.3) Die Häufigkeiten der Begründungen, die Lernende zur Erklärung eines aufsteigenden Wasserstoff- bzw. sinkenden Kohlenstoffdioxidballons anführten, sind in Abbildung 10.21 dargestellt.

Analog zu Item 1 argumentierte die Mehrheit der Lernenden im Post-Test mit der

Abbildung 10.21*Vergleich der Begründungen für den Auftrieb in Gasen (Item 2)*

Dichte, wobei dies im Follow-up-Test etwas abnahm. Im Gegensatz zu Item 1 zeigte sich jedoch eine geringere Dominanz der Begründung mit der Masse im Prä- und Follow-up-Test. Ähnlich häufig wie die Masse wurde der Stoff selbst für das Aufsteigen bzw. Sinken des Ballons verantwortlich gemacht oder es wurde auf bekannte Phänomene mit der Luft zurückgeführt, wie die folgende Antwort verdeutlicht: „Da warme Luft nach oben steigt, könnte es sein, dass wenn man den Ballon mit warmer Luft/Wasserstoff füllt, er in die Luft steigt“ (S11_E3_Prä). Als sonstige Begründungen wurden im Prä-Test das „Hochwerfen des Ballons“ sowie die „Umwandlung des Wasserstoffs in eine Wolke“ und im Follow-up-Test das zu „schwere Volumen“ codiert.

Darüber hinaus wurde bei allen drei Tests im Gegensatz zu Item 1 ein relativ hoher Anteil an fehlenden Begründungen festgestellt. Es wurden zudem keine Mehrfachbegründungen angegeben.

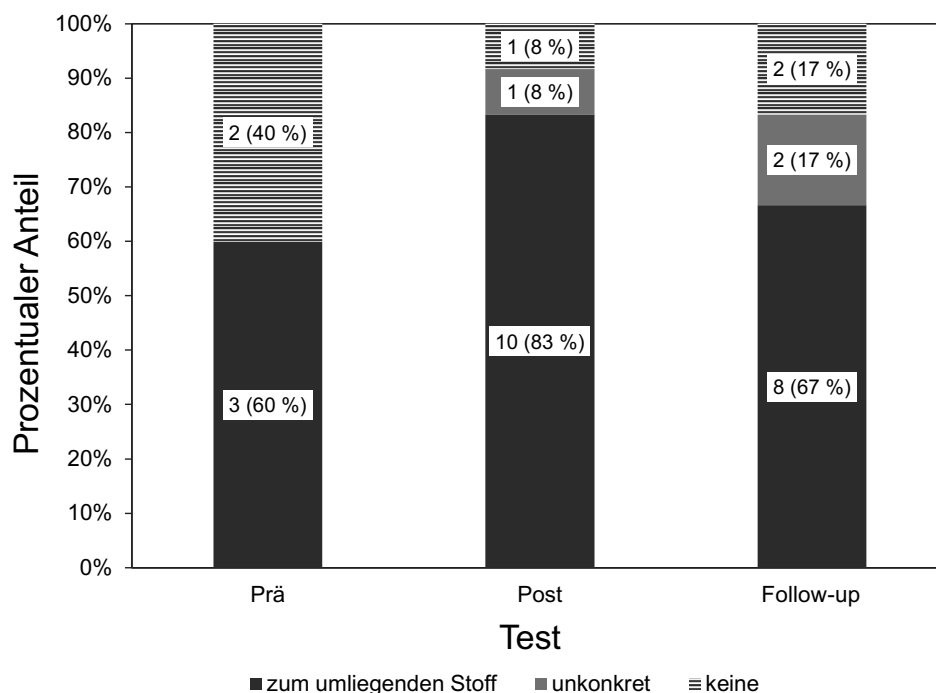
Hinsichtlich der Begründungsverläufe in Abbildung 10.21 lässt sich erkennen, dass die Mehrheit der Lernenden, die im Follow-up-Test mit der Dichte argumentierten, bereits im Prä-Test eine Begründung angegeben hat. Gleichzeitig gab die Mehrheit

der Lernenden, die im Follow-up-Test alternative Begründungen anführten, im Prä-Test keine Begründung an.

Bezüglich der bei den Begründungen mit der Dichte oder der Masse angegebenen Relationen (siehe Abbildung 10.22) zeigte sich ein ähnliches Ergebnis wie bei Item 1.

Abbildung 10.22

Vergleich der hergestellten Relationen zum umliegenden Stoff für den Auftrieb in Gasen



So war der Anteil der Begründungen ohne Relation im Prä-Test hoch, während er im Post- und Follow-up-Test deutlich geringer war. Im Gegensatz zu Item 1 gab es jedoch kaum unkonkrete Relationen, sondern fast ausschließlich Relationen zum umliegenden Stoff.

Vergleich zu E2 Auch bei E2 war der Anteil an Lernenden die keine Begründung angaben mit 8 von 18 im Prä- und fünf im Post-Test im Vergleich zu Item 1 relativ hoch. Sieben der verbliebenen Lernenden im Prä-Test und damit der größte Anteil

begründeten das Aufsteigen des Ballons mit dem Stoff selbst. Im Post-Test hingegen begründeten sieben Lernende mit der Dichte. Analog zu E3 wurde im Prä- und Post-Test im Vergleich zu Item 1 kaum mit der Masse begründet.

Hinsichtlich der Relationen war kein aussagekräftiger Vergleich zwischen Prä- und Post-Test möglich, da Relationen ausschließlich bei Begründungen mit der Dichte oder mit der Masse codiert wurden und dies im Prä-Test auf lediglich eine Person zutraf. Es zeigte sich jedoch, dass alle acht Lernenden, die im Post-Test mit der Dichte oder der Masse begründeten, eine Relation zum umliegenden Stoff angaben.

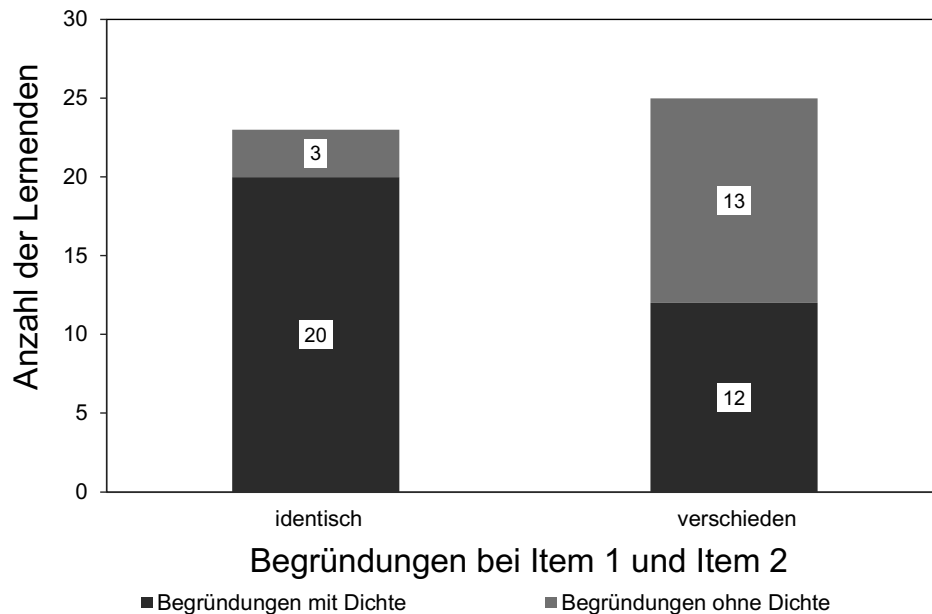
Vergleich der Begründungen in gasförmigen und flüssigen Stoffen (Item 1 & 2, F3.3.4) Mithilfe der Code-Pattern-Analyse in MAXQDA wurde für den Post- und Follow-up-Test zusätzlich analysiert, inwieweit die Lernenden in Item 1 und Item 2 identische Begründungen angaben und wie sich dies speziell bei den Begründungen mit der Dichte verhielt. Aufgrund der geringen Anzahl von Begründungen mit der Dichte im Prä-Test wurde die Analyse nur für den Post- und Follow-up-Test durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Analyse sind in Abbildung 10.23 dargestellt. Daraus lässt sich ableiten, dass etwa gleich viele Lernende identische Begründungen für Item 1 und Item 2 gaben wie unterschiedliche Begründungen. Gleichzeitig ist zu erkennen, dass bei den identischen Begründungen die Anzahl der Lernenden, die mit der Dichte begründeten, fast doppelt so hoch war wie bei den verschiedenen Begründungen.

Vergleich zu E2 Auch bei E2 gaben etwa gleich viele Lernende in Item 1 und Item 2 identische Begründungen (acht Lernende) an wie unterschiedliche Begründungen (10 Lernende). Im Gegensatz zu E3 war allerdings die Anzahl der Lernenden, die mit der Dichte begründeten, bei beiden Kategorien mit sechs bzw. sieben Lernenden etwa gleich groß.

Allgemeines Dichteverständnis (Item 3, F3.3.5 & F3.3.8) In Abbildung 10.24 ist zunächst dargestellt, wie viele Aspekte die Lernenden zur Dichte nannten, als sie alles aufschreiben sollten, was sie zur Dichte wissen. Es fällt auf, dass bereits im Prä-Test etwas mehr als die Hälfte der Lernenden ein bis zwei Aspekte zur Dichte nannten. Im Post-Test stieg die Anzahl der Lernenden, die einen Aspekt nannten, deutlich an, während die Anzahl der Lernenden, die zwei Aspekte nannten, mit vier

Abbildung 10.23

Vergleich der Begründungen in Item 1 und Item 2



Anmerkung. Die Anzahl der Lernenden ist die Summe der Lernenden aus Post- und Follow-up-Test.

in etwa gleich blieb. Drei Lernende nannten im Post-Test drei oder vier Aspekte. Beim Übergang zum Follow-up-Test hat sich die Anzahl der Lernenden, die zwei Aspekte nannten, fast verdoppelt. Ähnlich viele Lernende nannten keinen oder nur einen Aspekt, während eine Person drei oder vier Aspekte aufzählte.

Ein Vergleich der genannten Aspekte der Dichte sowie deren Bepunktung ist in Abbildung 10.25 dargestellt.

Daraus lässt sich entnehmen, dass es im Prä-Test viele alternative Vorstellungen zur Dichte gab. Mit jeweils vier Nennungen wurde am häufigsten die Dichte mit „wasser- und luftdicht“ oder mit „Gedichten“ in Verbindung gebracht. Weiterhin wurde die Dichte als „Maß für die in Objekten enthaltene Luft“, als „Maß für die Teilchennähe“ oder allgemein als „Nähe und Enge“ interpretiert. Die beiden Codierungen mit *Relation zu Masse und Volumen* gehen auf zwei Lernende zurück, die *Gewicht pro Volumen* angaben. Die jeweils eine Codierung bei *Stoffeigenschaft* und *Auftrieb* ist auf die folgende Antwort zurückzuführen: „Materialien können unterschiedliche Dichten haben. Materialien mit hoher Dichte treiben z. B. oben“ (S4_E3_Prä). Es wurde also erkannt, dass Stoffe sich in ihrer Dichte unterscheiden

Abbildung 10.24

Vergleich der Anzahl der Aspekte zur Dichte

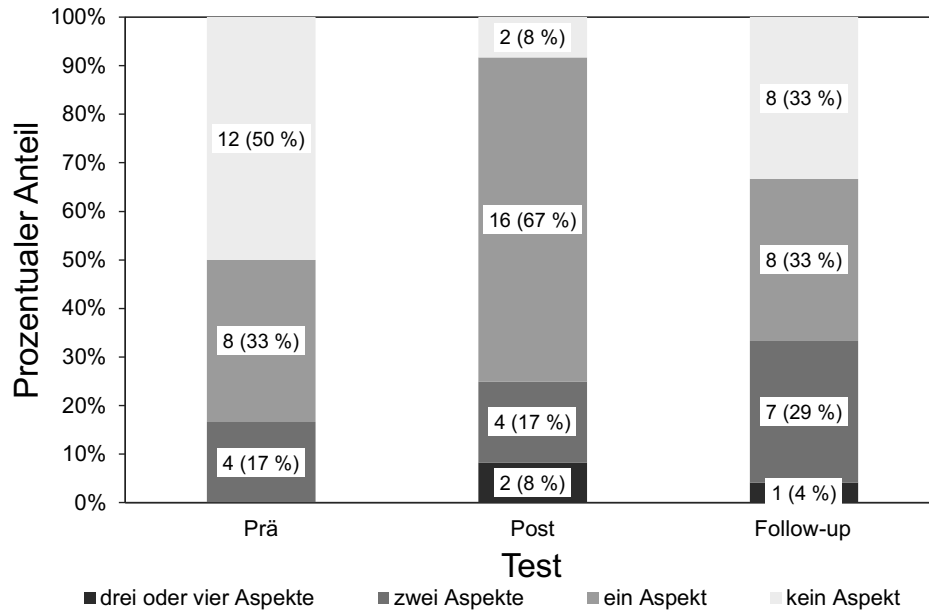
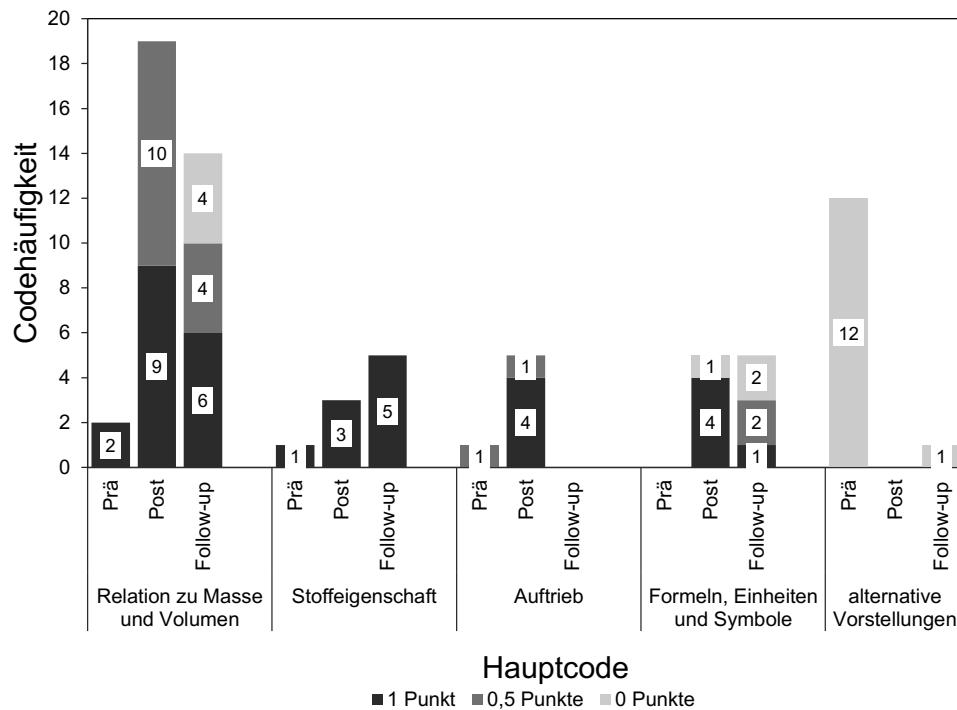


Abbildung 10.25

Vergleich und Bepunktung der genannten Aspekte zur Dichte



können (Stoffeigenschaft) und dass die Dichte mit der Schwimmfähigkeit von Stoffen zusammenhängt (Auftrieb). Für Letzteres gab es nur 0,5 Punkte, da die falsche Tendenz beschrieben wurde (hohe Dichte → Stoffe steigen auf).

Im Post- und Follow-up-Test wurde *Relation zu Masse und Volumen* mit großem Abstand am häufigsten codiert. Alternative Vorstellungen konnten im Post-Test nicht identifiziert werden. Im Follow-up-Test wurde die Vorstellung „Dichte als Maß für die in Objekten enthaltene Luft“ bei der gleichen Person wie im Prä-Test identifiziert. Die übrigen drei Hauptcodes wurden im Post- und Follow-up-Test nahezu gleich häufig vergeben. Lediglich der Code *Auftrieb* kam im Follow-up-Test kein einziges Mal vor.

Im Folgenden soll nun ein Einblick in die vielen verschiedenen Subcodes und Antworten der beiden Hauptcodes *Relation zu Masse und Volumen* und *Formeln, Einheiten und Symbole* gegeben werden, deren unterschiedliche Qualitäten sich in der in Abbildung 10.25 ersichtlichen Punkteverteilung widerspiegeln.

In der Kategorie *Formeln, Einheiten und Symbole* wurden im Post-Test vier Aspekte als richtig gewertet und demnach 1 Punkt vergeben. Dazu gehörte einmal die Formel „ $\frac{m}{V}$ “, zweimal die Einheit „ $\frac{g}{cm^3}$ “ und einmal der griechische Buchstabe „ ρ “. Keinen Punkt gab es hingegen für die Antwort „eine Einheit“ (S25_E3_Post). Im Follow-up-Test gab es erneut einen Punkt für die Einheit „ $\frac{g}{cm^3}$ “ und zweimal keinen Punkt für die unkonkrete Antwort „eine Formel“. 0,5 Punkte wurden zweimal für die Antwort „ $\frac{Kg}{V}$ “ vergeben, da die Lernenden hier zwar die korrekte Beziehung zwischen Masse und Volumen erkannten, jedoch Einheiten und Größen miteinander verwechselten. Eine Übersicht über die Verteilung der Subcodes zur Kategorie *Relation zu Masse und Volumen* ist in Abbildung 10.26 dargestellt.

Ein Punkt wurde vergeben, wenn die Lernenden die Dichte als *Masse pro Volumen* (z. B. „Dichte ist ein Gewicht pro Kubikzentimeter“, S2_E3_Post) oder als *Masse pro Kubikzentimeterwürfel* (z. B. „Schwere eines 1 cm³ großen Würfels“, S11_E3_Follow) interpretierten. Ebenso gab es einen Punkt, wenn darauf hingewiesen wurde, dass sich mit der Dichte die *Masse von Stoffen verhältnismäßig vergleichen* lässt (z. B. „Mit der Dichte kann man bestimmen welcher Stoff verhältnismäßig schwerer ist“, S7_E3_Post). 0,5 Punkte gab es bei ungenauen Formulierungen von *Masse pro Kubikzentimeterwürfel* (z. B. „Eine Dichte, ist der Wert des Würfels in g pro cm³“, S15_E3_Post) oder wenn die Lernenden nur einen unkonkreten Bezug der Dichte zu *Masse und Volumen* angaben. Kein Punkt wurde gegeben, wenn (a) die Dichte

Abbildung 10.26

Verteilung der Subcodes zur Kategorie „Relation zu Masse und Volumen“

Codesystem	E3_Prätest	E3_Posttest	E3_Follow-Up
3) Hast du schon mal den Begriff "Dichte" gehört? Schreibe alles auf, was du über Dichte weißt!			
Relation zu Masse und Volumen			
Masse pro Kubikzentimeterwürfel			
richtig (1)		2	1
ungenau (0.5)		6	2
Masse von Stoffen verhältnismäßig vergleichen			
richtig (1)		2	
ungenau (0.5)		4	1
Masse pro Volumen (1)	2	5	5
Masse und Volumen (0.5)			1
Masse			2
Volumen			2

nur mit der *Masse* oder dem *Volumen* in Verbindung gebracht wurde (z. B. „gibt an, wie viel dieser Stoff wiegt“, S18_E3_Follow), (b) wenn bei dem Massenvergleich von Stoffen nicht verhältnismäßig genannt wurde (z. B. „Durch Dichte kann man auch herausfinden, welcher Stoff schwerer ist“, S14_E3_Post) oder (c) wenn die Lernenden zwar explizit den Begriff „Würfel“ nannten, aber die Dichte nicht als Masse dieses Würfels interpretierten (z. B. „Die Dichte ist von einem Würfel ein Würfel also 1 cm^3 “, S12_E3_Follow).

Vergleich zu E2 Hinsichtlich der Anzahl der Aspekte, die Lernende zur Dichte nannten, wurden sowohl in Prä- als auch Post-Test mit 13 Lernenden überwiegend nur ein Aspekt genannt. Zwei Aspekte wurden im Prä-Test von zwei und im Post-Test von drei Lernenden genannt. Nur eine Person nannte im Post-Test drei Aspekte.

Bei der genaueren Betrachtung der genannten Aspekte zeigte sich bei E2 ebenfalls, dass im Prä-Test mit sechs Codierungen häufig alternative Vorstellungen identifiziert werden konnten und im Post-Test Aspekte der Kategorie *Relation zu Masse und Volumen* mit neun Nennungen deutlich häufiger angegeben wurden als Aspekte der Kategorie *Auftrieb* mit drei Nennungen.

Im Gegensatz zu E3 wurde jedoch auch im Post-Test acht mal die Kategorie *alternative Vorstellung* codiert. Alle die im Post-Test identifizierten alternativen Vorstellungen traten im Prä-Test nicht auf. Mit insgesamt fünf Nennungen wurde die Dichte am häufigsten mit dem Inneren eines Stoffes oder Gegenstandes in Verbindung

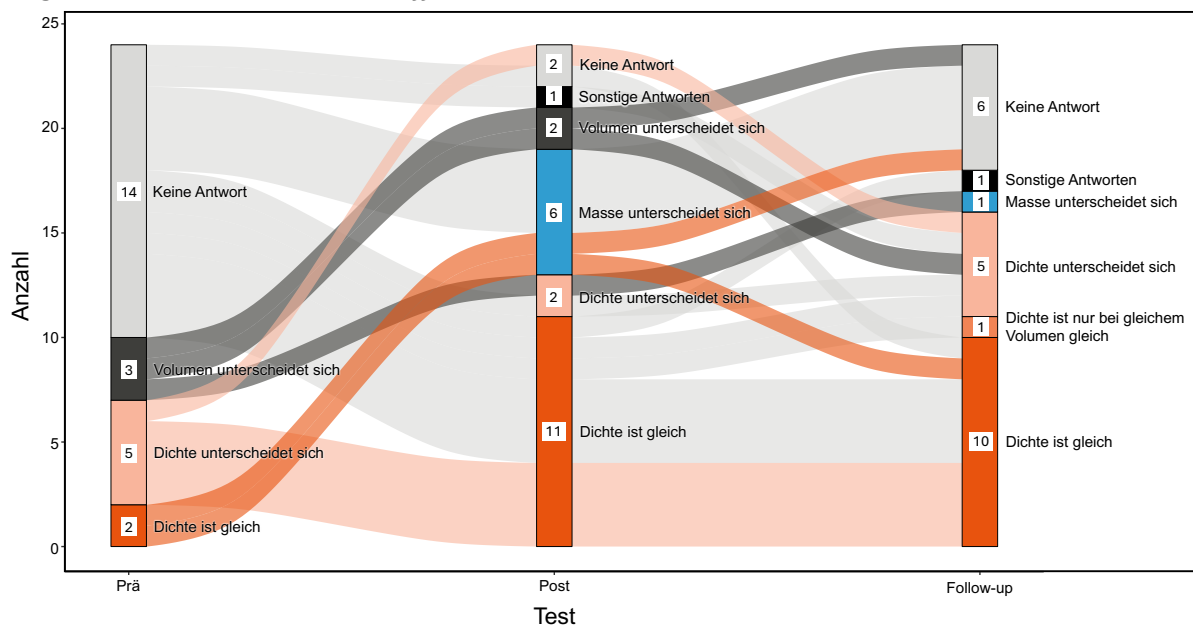
gebracht, wie beispielsweise „Die Dichte ist bei Stoffen/Gegenständen das innere“ (S6_E2_Test) oder „Ich weiß, das Dichte die füllung in einem Gegenstand ist“ (S18_E2_Post). Zwei Lernende interpretierten die Dichte als eine Mengenangabe und eine Person als „wie stark etwas aneinander gepresst ist“ (S2_E2_Post).

Weiterhin wurden im Gegensatz zu E3 bereits im Prä-Test insgesamt neun Aspekte der Kategorie *Relation zu Masse und Volumen* genannt. Sowohl im Prä- als auch im Post-Test waren dies fast ausschließlich Antworten, die die Dichte ausschließlich mit der Masse in Verbindung brachten oder mit dieser gleichsetzten. Beispielsweise gab S22 im Prä-Test an, dass sie oder er den Begriff *Dichte* schon kennt und dies ein anderer Begriff für das Gewicht sei. Ebenso bezeichneten weitere Lernende bereits im Prä-Test die Dichte als „Fachbegriff für Gewicht“ (S8_E2_Prä) oder als „ein anderes Wort für Gramm oder insgesamt das Gewicht“ (S6_E2_Prä).

Stoffmengeninvarianz der Dichte (Item 4, F3.3.7) Die Antworten auf die Frage nach dem Dichteunterschied von zwei unterschiedlich großen Eisenstücken bzw. auf eine analoge Frage im Follow-up-Test sind in Abbildung 10.27 dargestellt.

Abbildung 10.27

Vergleich der Antworten zur Stoffinvarianz der Dichte



Dabei fällt zunächst auf, dass im Prä-Test die Mehrheit der Lernenden keine Antwort auf die Frage gab, während der Anteil fehlender Antworten im Post-Test deutlich zurückging und im Follow-up-Test auf ein Viertel anstieg.

Weiterhin wird ersichtlich, dass im Prä-Test nur zwei Lernende korrekt erkannten, dass die Dichte gleich bleibt, während dies im Post- und Follow-up-Test etwas weniger als die Hälfte der Lernenden bemerkten. Eine Betrachtung der Begründungsverläufe zeigt zudem, dass die Mehrheit der Lernenden, die im Follow-up-Test die richtige Antwort gaben, dies auch im Post-Test taten. Zudem gab es eine Person, die zwischen der „insgesamten Dichte“ und der „Dichte pro cm^3 “ unterschied: „Der Draht wird kleiner und somit auch die Dichte. Aber die Dichte auf 1 cm^3 nicht, nur die gesamte“ (S6_E3_Follow).

Außerdem sank die Anzahl der Lernenden, die einen Dichteunterschied vermuteten, vom Prä-Test zum Post-Test von fünf auf zwei, stieg aber im Follow-up-Test wieder auf fünf an. Eine Betrachtung der Begründungsverläufe zeigt allerdings, dass es sich bei den fünf Lernenden von Prä- und Follow-up-Test überwiegend um verschiedene Lernende handelt. Jeweils vier der fünf Lernenden im Prä- und Post-Test nahmen an, dass sich die Dichte proportional zum Volumen der Stücke verändere, wie die folgende Antwort zeigt: „Das große Stück ist mehr Dichte“ (S23_E3_Prä). Die jeweils verbliebene Person gab nicht genau an, inwieweit sich die Dichte der Stücke unterscheidet. Im Post-Test blieb eine Person ebenso unspezifisch, während die andere Person von einem antiproportionalen Verhältnis zwischen Dichte und Volumen ausging.

In allen drei Tests gab es Lernende, welche die Frage nicht beantworteten, sondern angaben, inwieweit sich die Masse oder das Volumen der Stücke unterscheiden. Vor allem im Post-Test war der Anteil der Lernenden, die Unterschiede in der Masse angaben, besonders hoch. Fünf der sechs Lernenden gaben an, dass das kleinere Stück schwerer sei. Vier betonten zusätzlich, dass dies immer der Fall sei.

Die Antwort „Die Dichte des großen Stückes ist mehr verteilt als die bei dem kleinen Stück“ (S5_E3_Post) wurde im Post-Test mit *Sonstige* codiert und im Follow-up-Test die Antwort „Es gibt keine mehr“ (S12_E3_Follow).

Neben den Antworten wurden auch die Begründungen der Lernenden codiert, deren Antwort sich auf die Dichte bezog, d. h. die mit einem der drei Dichtecodes codiert wurden.

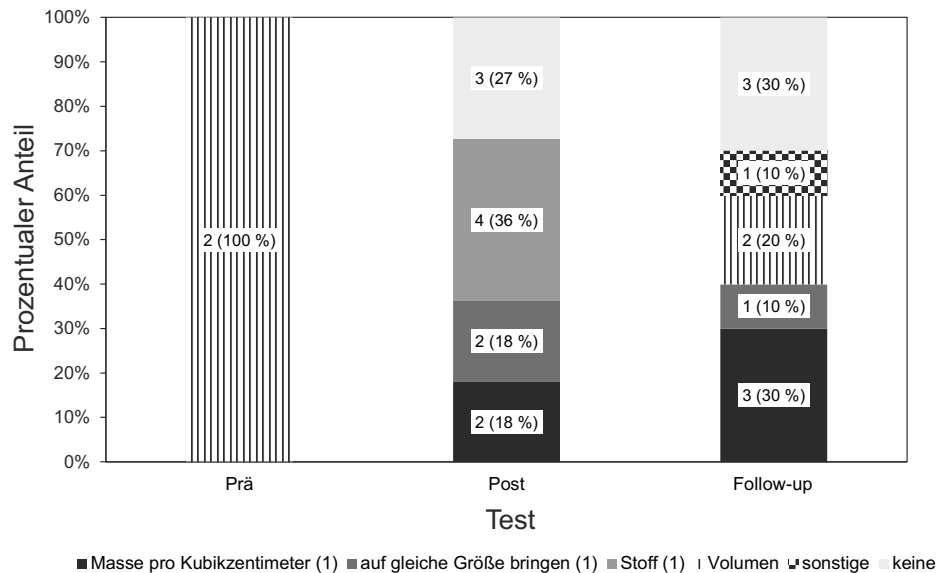
Von den Lernenden, deren Antwort mit *Dichte unterscheidet sich* codiert wurde, gaben im Prä- Test zwei Lernende keine Begründung. 2 Lernende argumentierten mit der Masse (z. B. „Das große Stück hat eine größere Dichte, da es schwerer ist“, S18_E3_Prä), während die Begründung „Ich glaube die Dichte des großen Stückes ist höher, da mehr Material auf Material trifft“ (S3_E3_Prä) mit *Sonstige* codiert wurde. Im Post-Test gaben zwei Lernende keine Begründungen an und im Follow-up-Test drei. Die verbleibenden zwei Lernenden im Follow-up-Test argumentierten mit dem Volumen (z. B. „Der Draht wird kleiner und dadurch die Dichte auch“, S5_E3_Follow).

Die eine Person, deren Antwort im Follow-up-Test mit *Dichte ist nur bei gleichem Volumen gleich* codiert wurde gab keine Begründung an.

Die Begründungen der Lernenden, deren Antworten mit *Dichte ist gleich* codiert wurden, sind in Abbildung 10.28 dargestellt.

Abbildung 10.28

Vergleich der Begründungen zur Stoffmengeninvarianz der Dichte



Anmerkung. Dargestellt sind nur die Begründungen zu den Antworten, die mit *Dichte ist gleich* codiert wurden.

Darin wird deutlich, dass im Prä-Test zwei Lernende mit dem Volumen (z. B. „Nein, weil die Dichte wird nicht dichter wenn es mer Eisen gibt“, S15_E3_Prä) argumentierten.

Im Post-Test wurde bei etwa drei Viertel der Antworten eine Begründung angegeben, die mit einem Punkt bewertet wurde, während die restlichen Lernenden keine Begründung angaben. Insgesamt vier Lernende begründeten die Stoffinvarianz der Dichte mit dem gleichbleibenden Stoff: „Die Dichte unterscheidet sich nicht weil es der gleiche Stoff ist “ (S14_E3_Post). Jeweils zwei Lernende begründeten die Invarianz mit der gleichen Masse pro Kubikzentimeter (z. B. „Sie unterscheidet sich nicht, da die Masse pro cm^3 gleich bleibt“, S18_E3_Post) oder mithilfe des Angleichens der Größe beider Stücke: „Die dichte ist gleich, da wenn man das große Stück Eisen kleiner macht und es die gleiche größe wie das kleine Stück hat, kann man sie vergleichen“ (S10_E3_Post).

Im Follow-up-Test sank der Anteil der Begründungen, die mit einem Punkt bewertet wurden, während die Anzahl an fehlenden Begründungen gleich blieb. Es gab keine Person, welche die Stoffmengeninvarianz mithilfe des Stoffes begründete. Zwei Lernende bezogen sich in ihrer Begründung auf das Volumen. Die Antwort „Gar nicht, weil überall gleich viel Dichte ist“ (S14_E3_Follow) wurde mit *Sonstige* codiert.

Vergleich zu E2 Analog zu E3 stieg die Anzahl der Lernenden, die korrekt erkannten, dass die Dichte gleich bleibt, von eins im Prä-Test auf etwas weniger als die Hälfte (sieben Lernende) im Post-Test an. Im Gegensatz zu E3 blieb allerdings die Anzahl der Lernenden, die einen Dichteunterschied vermuteten, mit sechs im Prä-Test und sieben im Post-Test nahezu konstant.

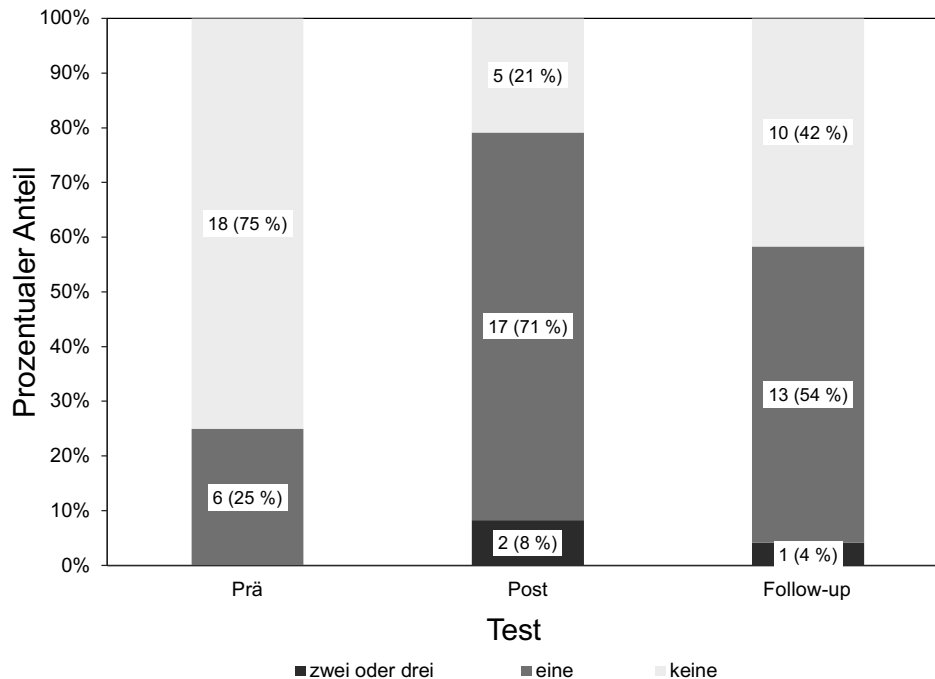
Hinsichtlich der Begründungen zeigte sich, dass im Gegensatz zu E3 niemand eine angemessene Begründung für die Invarianz der Dichte angeben konnte. Stattdessen wurde lediglich beschrieben, dass sich die Masse oder das Volumen unterscheidet, wie z. B.: „Das Volumen steigt, die Dichte bleibt“ (S16_E2_Post).

Die Antworten der Kategorie *Dichte unterscheidet sich* wurden im Prä-Test überwiegend auf Unterschiede in der Masse und im Post-Test auf Unterschiede in dem Volumen zurückgeführt.

Interpretation von Dichtewerten (Item 5, F3.3.6 & F3.3.9) In Abbildung 10.29 ist die Anzahl der Interpretationen eines Dichtewertes dargestellt.

Abbildung 10.29

Vergleich der Anzahl der Interpretationen eines Dichtewertes

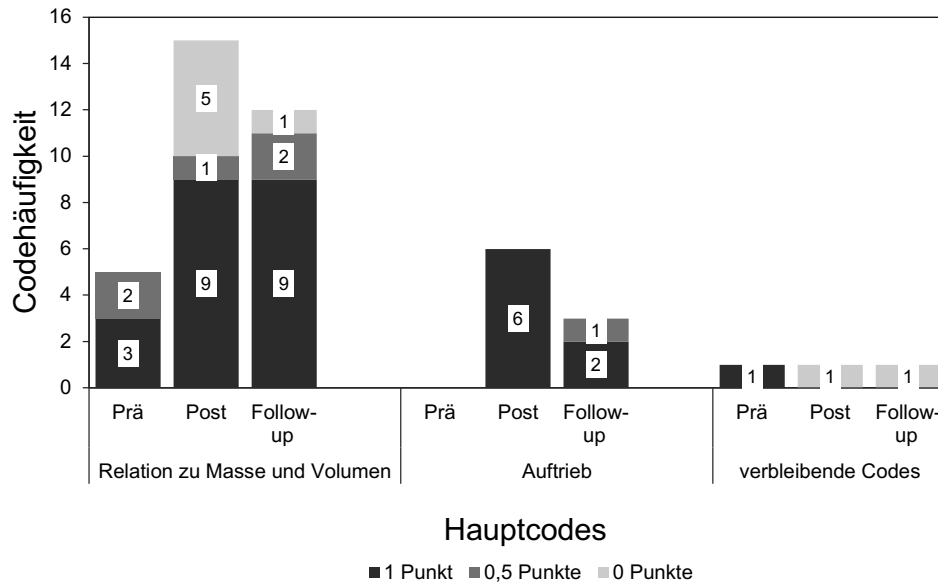


Daraus lässt sich entnehmen, dass ein erheblicher Anteil der Lernenden im Prä-Test den Dichtewert nicht interpretierte. Im Post- und Follow-up-Test hingegen gab die Mehrheit der Lernenden eine Interpretation an, wenngleich der Anteil im Follow-up-Test niedriger als im Post-Test ausfiel. Mehrfache Interpretationen konnten im Post- und Follow-up-Test identifiziert werden und stellten eine Ausnahme dar. Abbildung 10.30 zeigt einen Vergleich der Hauptcodes für die Interpretationen eines Dichtewertes.

Daraus lässt sich entnehmen, dass es bereits im Prä-Test einige mit 1 oder 0,5 Punkten bewertete Interpretationen gab. Interpretationen mit dem Code *Auftrieb* konnten dort noch nicht beobachtet werden. Im Post- und Follow-up-Test wurde die Mehrheit der Interpretationen mit *Relation zu Masse und Volumen* codiert. Die Anzahl der davon mit einem Punkt bewerteten Interpretationen war im Post- und

Abbildung 10.30

Vergleich und Bepunktung der Hauptcodes für die Interpretationen eines Dichtewertes



Follow-up-Test identisch. Im Vergleich zu *Relation zu Masse und Volumen* wurden im Post- und Follow-up-Test deutlich weniger Interpretationen mit *Auftrieb* codiert. Zudem nahm die Anzahl vom Post- zum Follow-up-Test ab.

Im Folgenden soll nun genauer auf die Interpretationen und die Subcodierungen eingegangen werden. Die Subcodes und deren Häufigkeit in den jeweiligen Tests sind in Abbildung 10.31 dargestellt.

Daraus lässt sich entnehmen, dass in allen drei Tests die meisten Punkte mit der Interpretation des Dichtewertes als *Masse pro Kubikzentimeter* erreicht wurden (z. B. „0,97 $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ bedeutet, dass ein 1 cm^3 von Natrium 0,97 g wiegt“, S7_E3_Follow). Im Post-Test wurde bei diesem Code jedoch häufig die Dichte von Schwefel ($2 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$) fälschlicherweise als „1 g pro 1 cm^3 “ (*Wert=Masse=Volumen*) interpretiert. Jeweils einmal im Prä- und einmal im Post-Test wurde *ungenau* codiert und mit 0,5 Punkten bewertet, weil eine Person die Einheiten von Masse und Volumen vertauschte und eine andere Person den Wert als „Schwefel beträgt pro cm^3 2 g“ (S20_E3_Prä) interpretierte.

Ebenfalls mit 0,5 Punkten bewertet wurden die Interpretationen, in denen der Dichtewert mit *Masse und Volumen* in Verbindung gebracht wurde, aber konkrete Werte fehlten (z. B. „das bedeutet gramm pro kubikzentimeter“, S20_E3_Follow). Keine

Abbildung 10.31

Verteilung der Subcodes zu Item 5

Codesystem	E3_Prätest	E3_Posttest	E3_Follow-Up
5) Die Dichte von Schwefel beträgt 2 g/cm ³ /von Natrium beträgt 0,97 g/cm ³ . Was bedeutet dieser Wert für dich?			
Relation zu Masse und Volumen			
Masse pro Kubikzentimeter(-Würfel)			
richtig (1)		1	1
ungenau (0.5)			1
Masse pro Kubikzentimeter			
richtig (1)	3	8	8
ungenau (0.5)	1	1	
Wert=Masse=Volumen		4	
Masse und Volumen (0.5)	1		1
Masse oder Volumen		1	1
Auftrieb			
Auftrieb in der Luft			
richtig (1)		2	
falsch (0.5)			1
Auftrieb in Wasser (1)		4	2
Rechnung			
richtig (1)	1		
unkonkret			
falsch			1
Dichte		1	

Punkte hingegen gab es, wenn Lernende den Dichtewert nur als *Masse oder Volumen* interpretierten, wie die Antwort „2 gramm“ (S14_E3_Post) verdeutlicht.

Nur insgesamt drei Lernende interpretierten den Dichtewert im Post- und Follow-up-Test explizit anhand eines Würfels, sowohl richtig (z. B. „Er bedeutet das ein 1 cm³ großer Würfel des Natriums immer 0,97 g wiegt also (g auf cm)“, S11_E3_Follow), als auch ungenau („Für mich bedeutet das, dass dieses Wert (0,97 g) ein Würfel ist“, S15_E3_Follow).

Hinsichtlich des Hauptcodes *Auftrieb* zeigte sich, dass die Lernenden überwiegend den Dichtewert als Maß für den Auftrieb in Wasser interpretierten (z. B. „Schwefel würde im Wasser untergehen, da die Dichte größer ist“, S9_E3_Post). Einige wenige Lernende trafen jedoch auch Aussagen zum Auftrieb in der Luft (z. B. „Schwefel steigt in Luft nicht auf (sinkt)“, S18_E3_Post).

Bezüglich der verbliebenen Codes zeigte sich, dass zwei Lernende anhand des Dichtewertes auf die Berechnung der Dichte schlossen, wobei eine Person mit „g:cm“

eine falsche Rechnung notierte. Eine andere Person antwortete lediglich, dass dies die Dichte sei.

Vergleich zu E2 Auch bei E2 war der Anteil an Lernenden, die im Prä-Test den Dichtewert nicht interpretierten mit acht Lernenden deutlich größer als im Post-Test mit vier Lernenden. Mehrfache Interpretationen konnten nicht identifiziert werden.

Im Gegensatz zu E3 konnten bei E2 weder im Prä- noch im Post-Test Interpretation der Kategorie *Auftrieb* identifiziert werden. Im Prä-Test wurde der Dichtewert mit acht Lernenden nahezu ausschließlich als *Masse pro Kubikzentimeter* interpretierten, wobei sechs Lernende fälschlicherweise den Dichtewert $2 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ als „2 g pro 2 cm³“ interpretierten und zwei Lernende sich unpräzise ausdrückten und daher nur 0,5 Punkte erreichten. Im Post-Test wurde der Dichtewert mit sechs Lernenden zum Großteil als Masse pro Kubikzentimeter interpretiert. Von diesen Interpretationen waren zwei korrekt und zwei teilweise korrekt. Es gab jedoch auch drei Lernende, die den Wert als Masse pro Kubikzentimeterwürfel interpretierten. Zwei Lernende davon formulierten dies korrekt.

10.4.3 Diskussion

In diesem Unterkapitel wurde untersucht, inwiefern sich ein Lernzuwachs durch die Intervention erkennen lässt. Dazu wurde ein Test mit fünf offenen Items entwickelt und in einem Prä-Post-Follow-up-Design durchgeführt. Die Auswertung der Tests erfolgte mittels qualitativer Inhaltsanalyse sowie statistischer Tests.

Lernzuwachs (F3.3.1) Die statistischen Tests ergaben, dass es bei E3 einen signifikanten Zuwachs in der Gesamtpunktzahl von Prä- zu Post-Test sowie von Prä- und Follow-up-Test gab. Es konnte zudem eine Abnahme der Gesamtpunktzahl von Post- zu Follow-up-Test beobachtet werden, diese war allerdings nicht signifikant. Auch bei E2 konnte ein signifikanter Lernzuwachs von Prä- zu Post-Test beobachtet werden.

Die Lernenden bewältigten somit insgesamt die vorstellungsorientierten Aufgaben unmittelbar nach der Intervention sowie sowie etwa fünf Wochen danach signifi-

kant besser als zuvor. Diese Ergebnisse legen nahe, dass die Intervention zu einer nachhaltigen Vorstellungsentwicklung führen kann.

Hinsichtlich der itemweisen Betrachtung der Punktzahlen zeigte sich bei beiden Erprobungen ein Lernzuwachs von Prä- zu Post-Test bei allen fünf Items. Dieser war bei E3 bei allen fünf Items und bei E2 bei den Items 1, 2 und 4 signifikant. Zudem konnte bei E3 ein signifikanter Lernzuwachs bei allen fünf Items zwischen Prä- und Follow-up-Test identifiziert werden.

Die Intervention scheint somit insgesamt zu einer nachhaltigen Vorstellungsentwicklung der Würfel- und Auftriebsvorstellung zu führen.

Dass sich bei E2 keine signifikanten Lernzuwächse bei den Items 3 und 5 zeigten, könnte darauf zurückzuführen sein, dass bei diesen Items beide Grundvorstellungen gleichzeitig angewendet werden müssen. Im Gegensatz dazu erfordern die Items 1, 2 und 4 nur die isolierte Anwendung jeweils einer Grundvorstellung. Die Ergebnisse deuten somit darauf hin, dass die Lernenden die Grundvorstellungen zwar isoliert anwenden können, jedoch Schwierigkeiten bei der gleichzeitigen bzw. vernetzten Anwendung zeigen. Dies unterstreicht die Notwendigkeit einer Vernetzung der Grundvorstellungen, wie sie in der Literatur gefordert (siehe Abschnitt 2.2.3) und insbesondere in der Vernetzungsphase der Unterrichtskonzeption umgesetzt wird.

Eine mögliche Erklärung für die Schwierigkeiten bei der simultanen Anwendung der beiden Grundvorstellungen in E2 im Vergleich zu E3 könnte darin liegen, dass in E2 die Vermittlung der beiden Grundvorstellungen im Abstand von einer Woche erfolgte, während sie in E3 direkt nacheinander behandelt wurden. Die unmittelbar aufeinanderfolgende Vermittlung in E3 könnte die Vernetzung der Grundvorstellungen implizit gefördert und so deren gemeinsames Anwenden erleichtert haben.

Auftriebsvorstellung

Auftrieb in flüssigen Stoffen (F3.3.2) Die Ergebnisse zum Auftrieb in flüssigen Stoffen (Item 1) beider Erprobungen ergaben, dass zu allen drei bzw. zwei Testzeitpunkten mehr als 19 von 24 bzw. 13 von 18 der Lernenden korrekt das Schwimmen des Holz- bzw. Gummiwürfels vermuteten. Weiterhin begründete bei beiden Erprobungen mindestens die Hälfte der Lernenden das Schwimmverhalten im Prä-Test mithilfe der Masse und im Post-Test sowie Follow-up-Test (E3) mithilfe der Dichte.

Somit ist der gemessene Lernzuwachs bei Item 1 nicht auf eine Verbesserung bei der Identifikation der schwimmenden Würfel, sondern vielmehr auf die Zunahme der Begründungen mit der Dichte zurückzuführen. Die Intervention scheint somit das Begründen mit der Dichte beim Auftriebsverhalten in flüssigen Stoffen zu fördern. Zudem bestätigt die Dominanz der Begründung mit der Masse die Erkenntnisse in der Literatur, dass es sich dabei um eine der prominentesten alternativen Vorstellungen zum Schwimmen und Sinken handelt (siehe Abschnitt 8.2).

Weiterhin konnte bei E3 neben der Zunahme an Begründungen mit der Dichte eine deutliche Zunahme an Begründungen mit Berücksichtigung der Relation zum umliegenden Stoff von Prä- zu Post-Test und eine leichte Zunahme von Prä- zu Follow-up-Test beobachtet werden. Somit ergibt sich daraus bei E3 eine weitere Ursache für den beobachteten Lernzuwachs in Item 1. Da dies bei E2 nicht bestätigt werden konnte, lässt sich jedoch nur unter Vorbehalt schlussfolgern, dass die Intervention bei Begründungen zum Auftriebsverhalten in flüssigen Stoffen zu einer stärkeren Berücksichtigung des umliegenden Stoffes führen kann.

Hinsichtlich der Begründungsverläufe bei E3 konnte festgestellt werden, dass mehrere Lernende im Follow-up-Test zu ihrer Begründung aus dem Prä-Test zurückkehrten oder diese mit der Dichte kombinierten.

Dieses Ergebnis steht im Einklang mit dem häufig beobachteten Phänomen, dass alternative Vorstellungen nur schwer zu beseitigen sind und die Lernenden auf ihre alten Vorstellungen zurückfallen oder alte und neue Vorstellungen nebeneinander bestehen (siehe Abschnitt 3.2).

Zudem fiel auf, dass im Follow-up-Test nahezu keine Argumentation mit dem Stoff erfolgte und somit die Mehrheit der Lernenden, die im Prä-Test mit dem Stoff argumentierten, im Follow-up-Test mit der Masse argumentierten, statt zu ihrer vorherigen Begründung zurückzukehren.

Dies lässt sich vermutlich darauf zurückzuführen, dass der Stoff des schwimmenden Würfels im Follow-up-Test von Holz zu Gummi geändert wurde. Es ist anzunehmen, dass das Schwimmverhalten von Gummi im Vergleich zu Holz den Lernenden weniger aus dem Alltag bekannt sein dürfte.

Auftrieb in gasförmigen Stoffen (F3.3.3) Hinsichtlich der Ergebnisse zum Auftrieb in gasförmigen Stoffen (Item 2) zeigte sich analog zu Item 1 bei beiden Erpro-

bungen eine deutliche Zunahme an Begründungen mit der Dichte. Im Post-Test von E3 betrug der Anteil etwas mehr als die Hälfte, im Post-Test von E2 und im Follow-up-Test von E3 etwas weniger als die Hälfte.

Dies erklärt den gemessenen Lernzuwachs in Item 2 und lässt die Schlussfolgerung zu, dass die Intervention die Begründung des Auftriebsverhaltens mit der Dichte auch in gasförmigen Stoffen fördern kann.

Im Gegensatz zu Item 1 zeigte sich bei beiden Erprobungen jedoch unter den alternativen Begründungen kaum Begründungen mit der Masse. Stattdessen wurde häufig keine Begründung angegeben oder mit dem Stoff oder der Luft argumentiert. Hier spielen vermutlich mehrere Gründe eine Rolle. Zum einen ist die Vorstellung, dass Luft oder Gase keine Masse besitzen, eine gängige Alternativvorstellung unter Lernenden (Beerenwinkel & Parchmann, 2010), wodurch die Masse als mögliche Begründung für das Auftriebsverhalten in den Hintergrund rückt.

Zum anderen ist der Auftrieb in Gasen im Alltag der Lernenden durch beispielsweise Heißluftballons oder Abgasen aus Schornsteinen sichtbar, jedoch im Vergleich zum Schwimmen, wo Lernende den Auftrieb am eigenen Körper spüren können, kaum mess- oder wahrnehmbar (Peschel et al., 2021). Dies erschwert möglicherweise einen Zugang zu plausiblen Begründungen für Lernende, weshalb sie entweder keine oder aus dem Alltag bekannte Erklärungen, wie beispielsweise das Aufsteigen warmer Luft, angeben.

Hinsichtlich der bei den Begründungen berücksichtigten Relationen zeigte sich bei beiden Erprobungen ein besonders hoher Anteil an Lernenden in Post- und Follow-up-Test, der eine Relation zum umliegenden Stoff angab.

Ein Vergleich der Ergebnisse zum Prä-Test ist allerdings nicht möglich, da die Relationen ausschließlich bei Begründungen mit der Dichte oder der Masse codiert wurden und dies bei Lernenden im Prä-Test kaum der Fall war. Dennoch scheint die Intervention auch beim Auftriebsverhalten in gasförmigen Stoffen die Berücksichtigung der Relation zum umliegenden Stoff zu fördern.

Im Vergleich zu Item 1 wurde zudem festgestellt, dass der Anteil an Lernenden, die eine Relation zum umliegenden Stoff angaben, bei Item 2 insbesondere im Follow-up-Test von E3 und im Post-Test von E2 deutlich größer war. Die Lernenden gaben somit in gasförmigen Stoffen eher die Relation zum umliegenden Stoff an als in flüssigen Stoffen.

Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass den Lernenden die Identifikation des umliegenden Stoffes bei Item 1 deutlich schwerer fiel, da sich beim Schwimmen das Objekt an der Grenzfläche zwischen Wasser und Luft befindet statt vom gesamten Fluid umgeben zu sein (Peschel et al., 2021).

Hinsichtlich der Begründungsverläufe wurde festgestellt, dass im Gegensatz zu den Ergebnissen von Item 1 keine Person zu ihrer ursprünglichen Begründung aus dem Prä-Test zurückkehrte. Stattdessen zeigt sich, dass die Mehrheit der Lernenden, die im Follow-up-Test eine alternative Begründung angaben, im Prä-Test keine Begründung angegeben hatten. Gleichzeitig gab die Mehrheit der Lernenden, die im Follow-up-Test korrekt mit der Dichte argumentierten, im Prä-Test eine alternative Begründung an.

Dies deutet darauf hin, dass Lernende, die bereits im Prä-Test ihre Vorstellungen zum Auftrieb in Gasen explizit formuliert hatten, eine stärkere konzeptuelle Entwicklung in Richtung der Grundvorstellung erfahren haben als Lernende, die keine Begründung angaben.

Einen möglichen Erklärungsansatz bietet die Conceptual-Change-Theorie (siehe Abschnitt 3.2): Lernende mit einer alternativen Begründung im Prä-Test könnten versucht haben, ihre Vorstellungen zu bestätigen, wodurch sie sich intensiver mit der Intervention auseinandersetzten und stärkere kognitive Konflikte erlebten. Im Gegensatz dazu könnten Lernende ohne eine anfängliche Begründung weniger mental involviert gewesen sein, wodurch potenzielle kognitive Konflikte weniger intensiv erlebt wurden.

Vergleich der Begründungen in gasförmigen und flüssigen Stoffen (F3.3.4)

Ein Vergleich der Begründungen in Item 1 und 2 zeigte, dass etwa die Hälfte der Lernenden im Post- und Follow-up-Test bei E3 und im Post-Test bei E2 unterschiedliche Begründungen in Item 1 und 2 angaben.

Somit scheint bei vielen Lernenden der Aggregatzustand des Fluids einen Einfluss auf die Aktivierung der individuellen Vorstellungen zu haben. Dies bestätigt die Ergebnisse der Lernendeninterviews (siehe Abschnitt 8.5) erneut.

Gleichzeitig zeigte sich bei E3, dass bei identischen Begründungen in Item 1 und 2 die Anzahl der Lernenden, die mit der Dichte begründeten, fast doppelt so hoch

war wie bei den verschiedenen Begründungen. Bei E2 hingegen war die Anzahl der Lernenden, die mit der Dichte begründeten, in beiden Kategorien etwa gleich groß. Deshalb lässt sich nur unter Vorbehalt schlussfolgern, dass die Mehrheit der Lernenden, die durch die Intervention die Auftriebsvorstellung entwickeln, dies sowohl für den Auftrieb in Flüssigkeiten als auch in Gasen tun. Die Intervention scheint somit bei den meisten, wenn auch nicht bei allen Lernenden, die Entwicklung und Aktivierung der Auftriebsvorstellung für beide Fluide zu unterstützen.

Allgemeines Dichteverständnis (F3.3.5) & Interpretation von Dichtewerten (F3.3.6) Hinsichtlich der Items 3 und 5 zeigte sich, dass bei beiden Erprobungen zu allen drei bzw. zwei Testzeitpunkten insbesondere im Vergleich zur Würfelvorstellung nur wenige bis keine Lernenden die Aspekte der Auftriebsvorstellung nannten (Item 3) oder den Dichtewert mit Bezug zum Auftriebsverhalten interpretierten (Item 5).

Zusammen mit den positiven Ergebnissen in Item 1 und 2 kann dies so interpretiert werden, dass zwar viele Lernende nach der Intervention die Auftriebsvorstellung in auftriebsbezogenen Aufgaben und Kontexten aktivieren und anwenden, aber nur wenige die Auftriebsvorstellung mit dem Dichtebegriff oder mit Dichtewerten zu verknüpfen scheinen.

Eine mögliche Erklärung dafür könnte sein, dass der Dichtebegriff zunächst mit der Würfelvorstellung eingeführt wurde, wodurch diese stärker mit der Dichte assoziiert wird als die Auftriebsvorstellung. Weiterhin erscheint bei der Interpretation der Dichtewerte eine Interpretation mit der Würfelvorstellung naheliegender, da eine Verbalisierung der Dichtewerte mithilfe der Würfelvorstellung in der Intervention eingeübt wurde.

Würfelvorstellung

Stoffmengeninvarianz der Dichte (F3.3.7) Hinsichtlich der Würfelvorstellung wurde mithilfe von Item 4 überprüft, inwieweit die Lernenden die Invarianz der Dichte gegenüber der Menge eines Stoffes erkennen und begründen können. Es zeigte sich bei beiden Erprobungen, dass die Zahl der Lernenden, die die Invarianz der Dichte erfassten, von nahezu keiner Person im Prä-Test auf etwas weniger als die Hälfte im Post- und Follow-up-Test anstieg.

Dies erklärt den gemessenen Lernzuwachs bei Item 4 und lässt die Schlussfolgerung zu, dass die Intervention zu einem nachhaltigen Verständnis der Dichte als einer von der Menge eines Stoffes unabhängigen Größe beizutragen scheint, was einen wichtigen Aspekt der Würfelvorstellung darstellt.

Hinsichtlich der Begründungen zur Invarianz der Dichte zeigte sich bei E3, dass im Post-Test 8 von 11 Lernenden eine angemessene Begründung angeben konnten. Im Follow-up-Test waren es jedoch nur noch 4 von 10 Lernenden. Bei E2, bei der die Erarbeitung der Würfelvorstellung zeitlich eine Woche vor dem Post-Test stattfand, konnte niemand eine angemessene Begründung im Post-Test angeben.

Die Intervention scheint somit zwar zu einem kurzfristigen jedoch nur in begrenztem Maße nachhaltigen Lernzuwachs hinsichtlich der Erklärung der Invarianz der Dichte zu führen.

Einige wenige Lernende begründeten bei E3 die identische Dichte entweder mit der konstanten Masse pro Kubikzentimeter oder mit der Angleichung der Größe der beiden Stücke.

Während bei der ersten Begründung die Würfelvorstellung deutlich wird, zeigt sich bei der zweiten Begründung, dass die Lernenden auf die Lösungsidee aus der Erkundungsphase - es muss das gleiche Volumen betrachtet werden - zurückgreifen. Auch wenn diese Ergebnisse nur Einzelfälle darstellen, zeigen sie doch, dass die Intervention die Lernenden bei der Begründung der Invarianz der Dichte unterstützen kann - entweder durch die Ausbildung der Würfelvorstellung oder durch die Erkenntnisse aus der Erkundungsphase.

Besonders auffällig waren im Post-Test bei E3 5 Lernende, die angaben, dass das kleinere Stück Eisen schwerer sei. 4 betonten zusätzlich, dass dies immer der Fall sei.

Die Lernenden scheinen somit die Dichte mit der Masse gleichgesetzt und die intuitive Regel „je kleiner desto schwerer“ abgeleitet zu haben.

Eine mögliche Ursache für die intuitive Regel könnte an einer Übergeneralisierung der Erkenntnisse aus den Erkundungsaufgaben zur Würfelvorstellung liegen, da bei beiden Aufgaben jeweils das kleinste Objekt (Lakritzbonbon und Objekt aus Nickel) die größte Dichte hat. Es wäre demnach sinnvoll, bei einer der beiden Aufgaben ein größeres Objekt mit der größten Dichte zu wählen, um einer Übergeneralisierung entgegenzuwirken.

Allgemeines Dichteverständnis (F3.3.8) & Interpretation von Dichtewerten (F3.3.9)

Hinsichtlich der Items 3 und 5 zeigte sich im Prä-Test von E3, dass die Hälfte der Lernenden keinen Aspekt zur Dichte nannten und drei Viertel der Lernenden keine Interpretation des Dichtewertes angaben. Gleichzeitig zeigten sich fast ausschließlich alternative Vorstellungen bei der Aufzählung zu Aspekten der Dichte, die die Dichte beispielsweise mit wasser- und luftdicht oder mit der Nähe und Enge von Objekten in Verbindung brachten.

Der Dichtebegriff scheint den Lernenden somit zwar nicht bekannt, jedoch bereits mit vielen individuellen Vorstellungen verbunden zu sein. Diese scheinen sich auf alltägliche Bedeutungen des Begriffs „dicht“ zu beziehen und bestätigen daher die Erkenntnisse in der Literatur (Grüß-Niehaus & Schanze, 2010; Xu & Clarke, 2012).

Bei E2 konnten die Ergebnisse hinsichtlich der alternativen Vorstellungen bestätigt werden. Gleichzeitig gab es jedoch mehrere Lernende, die die Dichte in Item 3 mit der Masse gleichsetzten, indem sie diese beispielsweise als „Fachbegriff für Gewicht“ bezeichneten. Eine Person bestätigte dabei zusätzlich, dass sie die Dichte schon kenne. Zudem interpretierte etwa die Hälfte der Lernenden bereits im Prä-Test den Dichtewert als Masse pro Kubikzentimeter.

Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass den Lernenden möglicherweise bereits zuvor der Dichtebegriff vermittelt wurde und diese Vermittlung eine Gleichsetzung von Masse und Dichte begünstigt hat. Auch wenn die Lehrkraft die Nachfrage nach einer vorherigen Vermittlung der Dichte verneinte, ist eine Behandlung der Dichte in den Fächern *Physik* oder *Naturwissenschaften* nicht auszuschließen.

Im Post-Test der beiden Erprobungen nannte die Mehrheit der Lernenden einen Aspekt zur Dichte und nahezu alle Lernenden gaben genau eine Interpretation des Dichtewertes an.

Diese Ergebnisse zeigen, dass im Vergleich zum Prä-Test mehr Lernende in der Lage sind, Aspekte zum Dichtebegriff zu nennen und Dichtewerte zu interpretieren. Gleichzeitig wird deutlich, dass nicht einige wenige Lernende viele Aspekte und die Mehrheit keine nannten, sondern die Mehrheit der Lernenden mindestens einen Aspekt nannte.

In den Post- und Follow-up-Tests der beiden Erprobungen zeigte sich, dass Lernende am häufigsten Aspekte der Kategorie *Relation zu Masse und Volumen* nannten und den Dichtewert als Masse pro Kubikzentimeter interpretierten. Teilweise wur-

de sich dabei explizit auf einen (Kubikzentimeter-)Würfel bezogen. Weiterhin nannten bei E3 einige Lernende Aspekte, die die Dichte als eine Stoffeigenschaft hervorheben, oder gaben eine Einheit, die Formel oder das Symbol für die Dichte an.

Dies zeigt, dass nach der Intervention mehrere Lernende Aspekte der Würfelvorstellung mit dem Dichtebegriff sowie Dichteangaben zu verknüpfen scheinen.

Eine genauere Betrachtung der Items ergab, dass einige Lernende jedoch auch falsche Aspekte nannten, falsch die Dichtewerte interpretierten oder ungenau formulierten. So wurde bei nahezu allen Aspekten der Kategorie *Relation zu Masse und Volumen* in E2 die Dichte ausschließlich mit der Masse in Verbindung gebracht oder mit dieser gleichgesetzt.

Dies zeigte sich in diesem Maße nicht bei E3, sodass dies möglicherweise weniger auf die Intervention als auf die bereits vermutete, vorherige Vermittlung der Dichte bei E2 zurückzuführen ist.

Dennoch konnten bei E3 einige ungenaue Formulierungen identifiziert werden, wie etwa „Eine Dichte, ist der Wert des Würfels in g pro cm^3 “ (S15_E3_Post) oder „Durch Dichte kann man auch herausfinden, welcher Stoff schwerer ist“ (S14_E3_Post). Auch bei der Interpretation der Dichtewerte zeigten sich bei beiden Erprobungen teils ungenaue Formulierungen, wie beispielsweise „Der Schwefel beträgt 2 gramm pro Kubikzentimeter“ (S16_E2_Post) oder „Das Schwefel pro gramm 2 cm^3 wiegt“ (S20_E3_Post).

Solche Ungenauigkeiten haben zu Punktabzug geführt und sind somit ein Grund für die nicht signifikanten Lernzuwächse bei E2 und zwischen Prä- und Follow-up-Test bei E3. Es bleibt allerdings unklar, inwiefern diese Antworten auf tatsächliche Missverständnisse oder auf Schwierigkeiten bei der schriftlichen Formulierung zurückzuführen sind.

Auffällig war, dass bei E2 im Post-Test mehrfach die alternative Vorstellung, dass die Dichte das Innere eines Stoffes oder Gegenstandes sei, in Item 3 identifiziert werden konnte, die sich im Prä-Test nicht gezeigt hat. Somit ist diese höchstwahrscheinlich durch die Intervention induziert worden.

Ursache dafür könnten verschiedene Situationen gewesen sein. So wurde insbesondere bei dem Jahrmarktbild häufig auf das Innere der Objekte Bezug genommen. Beispielsweise wurden in den Plenumsphasen Dichteunterschiede mit der Füllung der Ballons oder der Enten begründet und eine Person äußerte bezüglich des Stär-

kewettbewerbs, dass die Gewichte aus Styropor seien. Weiterhin wurde im Rahmen des Schokoriegelexperiments der Fokus durch das Durchschneiden der Riegel möglicherweise auf die Füllung gelenkt.

Da diese Vorstellung im Rahmen von E3 nicht identifiziert werden konnte, scheint dies eher ein Einzelfall statt die Regel zu sein. Dennoch könnte es sinnvoll sein, beispielsweise das Durchschneiden der Schokoriegel wie bereits in Abschnitt 10.2 vorgeschlagen mithilfe von Bounty mini zu umgehen oder die Hohlkörper beim Entenfischen durch Vollkörper (z. B. Äpfel) zu ersetzen, um der Vorstellung entgegenzuwirken.

10.4.4 Zusammenfassung & Fazit

In diesem Abschnitt wurde untersucht, inwiefern die Intervention langfristige Vorstellungsentwicklungen von individuellen Vorstellungen hin zu den normativ formulierten Grundvorstellungen initiieren kann. Basierend auf den durchgeführten Prä-Post-Follow-up-Tests wurden mehrere zentrale Erkenntnisse gewonnen.

Lernzuwachs Die Analyse der Gesamtpunktzahlen zeigte sowohl unmittelbar nach der Intervention als auch zu einem späteren Zeitpunkt einen signifikanten Lernzuwachs. Aufgaben, die gezielt nur eine der beiden Grundvorstellungen ansprachen, zeigten bei beiden Erprobungen signifikante Verbesserungen. Bei Aufgaben, die beide Grundvorstellungen kombinierten, war eine signifikante Verbesserung nur bei E3 erkennbar. Dies unterstreicht einerseits die Wirksamkeit der Intervention zur Förderung nachhaltiger Vorstellungsentwicklungen, weist jedoch andererseits auf mögliche Herausforderungen bei der gleichzeitigen Anwendung mehrerer Grundvorstellungen hin. Möglicherweise hat der zeitliche Abstand zwischen der Vermittlung der beiden Grundvorstellungen in E2 die Vernetzung und damit die gleichzeitige Anwendung erschwert.

Auftriebsvorstellung Hinsichtlich der Auftriebsvorstellung zeigte sich eine Vorstellungsentwicklung dahingehend, dass die Lernenden das Auftriebsverhalten von Objekten sowohl in flüssigen als auch gasförmigen Stoffen stärker mit der Dichte begründeten. Zudem deutete sich bei den Begründungen des Auftriebsverhaltens nach der Intervention eine stärkere Berücksichtigung des umgebenden Fluids an.

Dies zeigte sich in gasförmigen Stoffen deutlicher als in flüssigen Stoffen, was möglicherweise auf die herausforderndere Identifikation des umgebenden Fluids beim Schwimmen und Sinken aufgrund der Luft-Wasser-Grenzfläche zurückzuführen ist. Es gab jedoch auch einige Lernende, bei denen keine langfristige Vorstellungsentwicklung zu beobachten war. In flüssigen Stoffen kehrten die Lernenden zu ihrer ursprünglichen Argumentation zurück oder kombinierten diese mit der Dichte, wobei die Begründung mit der Masse am prominentesten war. Diese Ergebnisse stehen im Einklang mit den Forschungsergebnissen zur Vorstellungsentwicklung (Vosniadou & Ioannides, 1998; Widodo & Duit, 2005) und zum Schwimmen und Sinken (Salim et al., 2024; Schaffert, 2022). In gasförmigen Stoffen zeigte sich die ausgebliebene Vorstellungsentwicklung hingegen in Form von fehlenden statt alternativen Begründungen, was möglicherweise auf die mangelnde Wahrnehmbarkeit des Auftriebs in Gasen zurückzuführen ist (Peschel et al., 2021).

Ein Vergleich der Begründungen in flüssigen und gasförmigen Stoffen ergab, dass die Hälfte der Lernenden im Post- und Follow-up-Test je nach Aggregatzustand des Fluids unterschiedlich argumentierten. Bei E3 deutete sich allerdings die Tendenz an, dass wenn die Lernenden mit der Dichte argumentierten, dies sowohl in flüssigen als auch gasförmigen Stoffen taten. Dies stützt einerseits den in den Lernendeninterviews bereits vermuteten Einfluss des Aggregatzustandes auf die Begründung des Auftriebsverhaltens. Andererseits deutet es auf eine potenzielle Förderung der Entwicklung der Auftriebsvorstellung für beide Aggregatzustände durch die Intervention hin.

Weiterhin deutete es sich an, dass nur wenige Lernende die Auftriebsvorstellung mit dem Dichtebegriff und Dichtewerten zu verknüpfen scheinen, da nur wenige bis keine Lernende Aspekte der Auftriebsvorstellung zum Dichtebegriff nannten oder einen Dichtewert mit Bezug zum Auftriebsverhalten interpretierten.

Würfelvorstellung Hinsichtlich der Würfelvorstellung zeigte sich die Vorstellungsentwicklung unter anderem darin, dass mehr Lernende die Invarianz der Dichte gegenüber der Menge eines Stoffes erkennen konnten. Weiterhin zeigte sich die Vorstellungsentwicklung dahingehend, dass die Lernenden nach der Intervention vermehrt den Dichtewert als Masse pro Kubikzentimeter interpretierten sowie Aspekte zum Dichtebegriff nannten, die (a) die Dichte in Relation zu Masse und Vo-

lumen setzen, (b) die Dichte als Stoffeigenschaft hervorheben oder (c) die Dichte mithilfe von Formeln, Symbolen und Einheiten beschreiben.

Es gab jedoch auch Hinweise auf eine nicht vorhandene oder mangelnde Entwicklung der Würfelvorstellung, die sich häufig durch fehlende Antworten, aber auch durch Fehler oder ungenaue Formulierungen bei der Interpretation von Dichtewerten oder der Nennung von Aspekten zum Dichtebegriff äußerten. Die Ungenauigkeiten in den Formulierungen lassen jedoch die Frage nach dem tatsächlichen Verständnis oder den Schwierigkeiten bei der Formulierung offen.

In E2 zeigte sich sowohl vor als auch nach der Intervention häufig eine Gleichsetzung zwischen Dichte und Masse, was die in der Literatur beschriebenen Erkenntnisse bestätigt (Grüß-Niehaus & Schanze, 2010). Diese konnte jedoch in E3 nicht bestätigt werden und ist höchstwahrscheinlich auf eine vorherige Behandlung der Dichte im Unterricht bei E2 statt auf die Intervention zurückzuführen.

Optimierungsbedarf In Einzelfällen konnten zwei höchstwahrscheinlich durch die Intervention induzierte Missverständnisse identifiziert werden.

Zum einen äußerten einige Lernende, dass kleinere Objekte notwendigerweise schwerer seien, was auf eine Generalisierung aus der Erkundungsphase hindeutet, in der das jeweils kleinste Objekt die größte Dichte aufwies.

Zum anderen sahen manche die Dichte als das Innere eines Objekts an. Dies ist vermutlich auf die Plenumsphasen und das Schokoriegelexperiment zurückzuführen, in denen sich Erklärungen für mögliche Dichteunterschiede auf die Füllung der verschiedenen Objekte bezog oder der Fokus darauf gelenkt wurde. Für beide Missverständnisse wurden Optimierungsvorschläge für die Intervention gemacht.

Fazit Insgesamt lässt sich zusammenfassen, dass die Ergebnisse auf eine teils langfristige Vorstellungsentwicklung in Richtung der Würfel- und Auftriebsvorstellung hindeuten.

Gleichzeitig zeigten die Ergebnisse, dass bei einigen Lernenden keine oder nur eine geringe Vorstellungsentwicklung stattgefunden hat. Dies spiegelt sich in den teils sehr niedrigen Werten der gesamt- und itemspezifischen Punktzahlen wieder, die auch nach der Intervention noch auftraten. Welche Faktoren dazu geführt haben könnten, bleibt an dieser Stelle unklar und bedarf weiterer Analysen.

In Bezug auf die übergeordnete Forschungsfrage (F3.3) lässt sich insgesamt schlussfolgern, dass die Intervention eine langfristige Entwicklung der individuellen Vorstellungen hin zu den normativen Grundvorstellungen initiieren kann. In Anbetracht der kurzen Dauer und Einmaligkeit der Intervention sind diese Ergebnisse äußerst positiv zu bewerten, da Vorstellungsentwicklungen im Allgemeinen zeitintensiv sind (Posner et al., 1982).

10.5 Fazit

In diesem Kapitel lag der Fokus auf der folgenden Forschungsfrage:

F3 Inwiefern sind Funktionalität und Wirksamkeit der Unterrichtskonzeption mit begleitenden Lernmaterialien gegeben?

Zur Beantwortung dieser Frage wurden die Artefakte der Lernenden, die Bewertungen der Unterrichtskonzeption mit begleitenden Lernmaterialien durch die Lernenden sowie die Prä-Post-(Follow-up)-Tests analysiert.

Die Analyse der Artefakte hat gezeigt, dass die meisten Lernenden die Materialien größtenteils wie intendiert bearbeitet haben. Somit scheinen die Lernmaterialien und die darin enthaltenen Designelemente überwiegend wie beabsichtigt zu funktionieren.

Des Weiteren führte die Evaluation der Unterrichtskonzeption durch die Lernenden zu grundsätzlich positiven Rückmeldungen. Insbesondere der Spaßfaktor, verschiedene Unterstützungsmaßnahmen und die Funktionsweisen ausgewählter Designelemente wurden von einem Großteil der Lernenden positiv bewertet. Dies unterstreicht ebenfalls die Funktionalität der entwickelten Lernmaterialien und Designelemente.

Die Ergebnisse des Prä-Post-(Follow-up)-Vergleichs deuten auf eine teils langfristige Entwicklung der Vorstellungen in Richtung der Würfel- und Auftriebsvorstellung hin. Dies liefert Hinweise darauf, dass die Unterrichtskonzeption mit begleitenden Lernmaterialien hinsichtlich des Lernziels – der Entwicklung von Grundvorstellungen – wirksam sein kann. Gleichzeitig zeigten einige Lernende keine oder nur eine geringe Vorstellungsentwicklung, deren Ursachen weiterführende Analysen bedürfen.

Zur ersten Einordnung werden an dieser Stelle die Testergebnisse mit den Ergebnissen der Artefaktanalyse explorativ trianguliert (Spearman-Rangkorrelationen zwischen den Gesamtpunktzahlen in den Artefakten und den Lernzuwächsen in den Tests).¹⁴ Die Analyse ergab für E3 eine hohe positive Korrelation zwischen Artefaktpunktzahlen und Prä-Post-Zuwachs ($\rho = .82, p < .001$) sowie Prä-Follow-up-Zuwachs ($\rho = .80, p < .001$). In der Erprobung E2 ohne Vertiefungsaufgaben zeigte sich ebenfalls ein positiver Zusammenhang ($\rho = .65, p = .003$). Eine wie intendierte Bearbeitung der Lernmaterialien geht demnach tendenziell mit größeren Lernzuwächsen einher. Dies unterstützt die Interpretation, dass die Materialien zur Entwicklung der Grundvorstellungen beitragen können. Zudem liefert es einen Erklärungsansatz für die nicht vorhandenen oder nur geringen Lernzuwächse bei einigen Lernenden.

Zusammenfassend lässt sich in Bezug auf die übergeordnete Forschungsfrage festhalten, dass die Unterrichtskonzeption mit begleitenden Lernmaterialien sowohl in ihrer Wirksamkeit als auch in der intendierten Funktionalität die Erwartungen weitestgehend erfüllt.

Gleichzeitig liefern die Erkenntnisse eine Antwort auf die verbliebene Forschungsfrage, inwiefern sich die hergeleiteten Grundvorstellungen in der Unterrichtsgestaltung bewähren (F1.10). So wurden auf Basis der Grundvorstellungen eine Unterrichtskonzeption und konkrete Lernmaterialien entwickelt, die in Teilen im realen Chemieunterricht erprobt und sich weitestgehend als funktional und wirksam erwiesen haben. Dies kann als eine erste Bewährung in der Unterrichtsgestaltung und damit als ein weiteres Indiz für die didaktische Relevanz der Grundvorstellungen interpretiert werden.

¹⁴Die Korrelationen wurden explorativ mittels Spearman-Rangkorrelation (zweiseitiger Test, $\alpha = .05$) berechnet. Variablen: Gesamtpunktzahl der Artefakte (entspricht dem arithmetischen Mittel aus den erreichten Gesamtpunktzahlen der beiden Grundvorstellungen) und Lernzuwachs (Post-Prä bzw. Follow-up-Prä). Die Berechnung erfolgte mithilfe von Excel.

Teil VI

Re-Framing

11 Zusammenfassung

11.1 Ausgangslage und Zielsetzung

Im Framing der vorliegenden Arbeit (siehe Teil IV) wurde auf Basis des theoretischen Hintergrundes die Behandlung mathematischer Begriffe im Chemieunterricht als eine relevante Problemlage in der Bildungspraxis herausgestellt.

So sind bereits in der Sekundarstufe I mathematische Begriffe wie etwa die Dichte, die Stoffmenge oder der pH-Wert fester Bestandteil des Chemieunterrichts. In empirischen Untersuchungen lassen sich allerdings häufig Schwierigkeiten im Umgang mit diesen Begriffen seitens der Lernenden beobachten. Dies zeigt sich insbesondere anhand von alternativen Vorstellungen und einem mangelnden, konzeptuellen Verständnis der Begriffe.

Daraus wurde die folgende übergeordnete Forschungsfrage für die vorliegende Arbeit formuliert:

In welcher Weise lässt sich das Verstehen mathematischer Begriffe im Chemieunterricht fördern?

Weiterhin wurde im Framing auf die Problematik hinsichtlich bereits bestehender Ansätze zur Förderung des Verständnisses mathematischer Begriffe hingewiesen. Es zeigte sich, dass häufig Ansätze existieren, die sich auf gezielte Maßnahmen zur Verständnisförderung fokussieren. Ein Mangel an übergreifenden Unterrichtskonzeptionen zur Vermittlung mathematischer Begriffe im Chemieunterricht wurde identifiziert und von Lehrkräften kritisiert. Die wenigen Unterrichtskonzeptionen basieren auf bestehenden, chemiedidaktischen Ansätzen, wie etwa Chemie im Kontext oder dem forschend-entwickelnden Unterrichtsverfahren, und schienen die mathematikdidaktische Perspektive außen vor zu lassen.

Darauf aufbauend wurde ein praxisorientiertes und ein theorieorientiertes Ziel für die vorliegende Arbeit formuliert:

- *Praxisorientiertes Ziel:* Entwicklung, Erprobung und Evaluation einer Unterrichtskonzeption mit begleitenden Lernmaterialien zur Förderung des Verständnisses mathematischer Begriffe im Chemieunterricht unter Berücksichtigung von sowohl chemie- als auch mathematikdidaktischen Ansätzen.
- *Theorieorientiertes Ziel:* Gewinnung theoriegenerierender Erkenntnisse über das Verstehen mathematischer Begriffe im Chemieunterricht sowie die Funktionsweisen und Wirksamkeit der Konzeption.

Als geeigneter Forschungsrahmen zur Beantwortung der Forschungsfrage und Erreichung der Ziele wurde der Design-Based Research-Ansatz gewählt. Dieser zielt neben der Entwicklung einer praxistauglichen Intervention (praktischer Output), in diesem Fall einer Unterrichtskonzeption mit begleitenden Lernmaterialien, ebenfalls auf die Generierung theoretischer Erkenntnisse beispielsweise zur Funktionsweise der Intervention ab (theoretischer Output).

Zur Erreichung der Ziele wurden zwei grundlegende Ansätze begründet ausgewählt und verfolgt:

1. *Mathematikdidaktischer Ansatz:* Die Entwicklung von Grundvorstellungen bei den Lernenden.
2. *Chemiedidaktischer Ansatz:* Die Darstellung der mathematischen Begriffe auf den drei Johnstone-Ebenen.

Konkret wurde dies anhand des Dichtebegriffs umgesetzt, da dies einer der ersten mathematischen Begriffe im Chemieunterricht ist. Gleichzeitig kann der Begriff als stellvertretend für weitere intensive Größen wie etwa die Stoffmengenkonzentration oder die molare Masse gesehen werden.

11.2 Herleitung der Grundvorstellungen zum Dichtebegriff

In Kapitel 8 wurden zunächst Grundvorstellungen zum Dichtebegriff hergeleitet. Die Forschungsfrage dazu lautete:

F1 Welche Grundvorstellungen lassen sich zur Dichte identifizieren?

Die Herleitung der Grundvorstellungen orientierte sich an dem Verfahrensrahmen von Salle und Clüver (2021). Auf Basis der historischen Entwicklung des Dichtebegriffs, empirischen Erkenntnissen zum Dichtebegriff insbesondere zu alternativen Vorstellungen sowie einer Schulbuchanalyse mit sieben Schulbüchern wurden insgesamt vier Grundvorstellungen zur Dichte hergeleitet und begründet den Johnstone-Ebenen zugeordnet (siehe Tabelle 11.1).

Tabelle 11.1

Übersicht über die vier Grundvorstellungen der Dichte und deren Zuordnung zu den Johnstone-Ebenen

Grundvorstellung	Interpretation der Dichte als...	Johnstone-Ebene
Würfelvorstellung	... Masse eines Kubikzentimeterwürfels	makroskopisch
Auftriebsvorstellung	... Instrument zur Erklärung und Vorhersage des Auftriebsverhaltens	makroskopisch
Teilchenvorstellung	... Gesamtmasse aller Teilchen in einem Einheitswürfel	submikroskopisch
Umrechnungsvorstellung	... Umrechnungsgröße zur Umrechnung zwischen Masse und Volumen	symbolisch

Anschließend wurden Zusammenhänge zwischen den Grundvorstellungen dargestellt und anhand dessen sowie unter Berücksichtigung curricularer Vorgaben eine idealtypische Reihenfolge zur Vermittlung der Grundvorstellungen hergeleitet:

1. Würfelvorstellung
2. Auftriebsvorstellung
3. Teilchenvorstellung
4. Umrechnungsvorstellung

Eine erste Evaluation der didaktischen Relevanz der Grundvorstellungen erfolgte mithilfe von exemplarischen Lernendeninterviews. Dabei wurden individuelle Vor-

stellungen von Lernenden zum Dichtebegriff erhoben und mit den formulierten Grundvorstellungen in Beziehung gesetzt.

Eine erste didaktische Relevanz zeigte sich darin, dass alle vier Grundvorstellungen bei einzelnen Lernenden zumindest teilweise als individuelle Vorstellungen identifiziert werden konnten und ein Erklärungsmodell für deren Handeln darstellten. Gleichzeitig zeigten sich bei den Lernenden viele aus der Literatur bekannte alternative Vorstellungen. Hinsichtlich der Auftriebsvorstellung deutete es sich an, dass der Aggregatzustand des Fluids einen Einfluss auf die Aktivierbarkeit oder die Entwicklung von Vorstellungen zu haben scheint.

11.3 Entwicklung der Unterrichtskonzeption mit begleitenden Lernmaterialien

In Kapitel 9 wurde die Unterrichtskonzeption *magic* mit begleitenden Lernmaterialien zur Vermittlung der identifizierten Grundvorstellungen entwickelt. Die dazugehörige Forschungsfrage lautete:

F2 In welcher Weise lässt sich eine Unterrichtskonzeption mit begleitenden Lernmaterialien zur Entwicklung der identifizierten Grundvorstellungen gestalten?

Die Entwicklung orientierte sich an fünf Designprinzipien, die literaturgestützt begründet und formuliert wurden:

1. Genetisches Lernen
2. Verwendung von Darstellungen und Wechsel zwischen verschiedenen Darstellungsformen
3. Anknüpfen an individuellen Vorstellungen
4. Sukzessive Vernetzung von Grundvorstellungen und Johnstone-Ebenen
5. Explikation von Grundvorstellungen

In einem ersten Schritt wurde eine Phasierung auf Basis des Strukturierungsmodells der *mathewerkstatt* für die Unterrichtskonzeption entwickelt, die eine Verwirklichung der Designprinzipien ermöglicht. Diese besteht aus den folgenden sechs Phasen:

1. *Fragen*: Lernende formulieren Fragen zu verschiedenen auf einem Cartoon abgebildeten Situationen, die auf bestimmte Grundvorstellungen abzielen.

Pro Grundvorstellung:

2. *Erkunden*: Lernende entwickeln individuelle Lösungen zu Problemen und Erklärungen zu Phänomenen, entdecken Zusammenhänge oder stellen Vermutungen auf und überprüfen diese experimentell.
3. *Erschließen*: Lernende durchdringen aktiv die individuell erkundeten Erkenntnisse, indem sie diese reflektieren, systematisieren und miteinander verknüpfen.
4. *Sichern*: Lernende dokumentieren das gewonnene Wissen zur langfristigen Verfügbarkeit auf einem Merktzettel.
5. *Vertiefen*: Lernende wenden zuvor gelerntes an und erweitern es.
6. *Vernetzen*: Lernende vernetzen die zuvor isoliert erarbeiteten Grundvorstellungen anhand komplexerer Aufgaben, die eine gezielte Nutzung und Kombination mehrerer Grundvorstellungen erfordern.

Die konkrete Ausgestaltung der Phasen wurde in Abschnitt 9.2 ausführlich beschrieben, wobei die grundvorstellungsspezifischen Phasen (2.-5.) exemplarisch anhand der Würfel- und Auftriebsvorstellung dargestellt wurden.

Zusammenfassend kann dies wie folgt beschrieben werden:

In der ersten Phase des Fragens formulieren Lernende anhand eines entwickelten Cartoons Fragen zu verschiedenen Situationen auf einem Jahrmarkt (z. B. Ballonstand oder Stärkewettbewerb), die auf eine bestimmte Grundvorstellung abzielen. Nachdem der Fokus der Lehrkraft auf die Fragen einer der Situationen gelenkt wurde, beginnt die Erarbeitung der jeweiligen Grundvorstellung.

Die Erarbeitung der Würfelvorstellung beginnt mit dem eigenständigen Entwickeln einer Lösungsidee zur Kernfrage „Wie lässt sich die Masse von Stoffen verhältnismäßig vergleichen?“ in der Phase des Erkundens. Anhand eines Süßigkeitenexperiments und Würfeldarstellungen entdecken die Lernenden dabei die Würfelvorstellung auf enaktiver und ikonischer Ebene sowie in Abhängigkeit der gewählten Lösungsstrategie die Berechnung der Dichte. Die gesammelten Erkenntnisse werden anschließend in der Phase des Erschließens im Plenum reflektiert und anhand eines Erklärvideos sowie begleitenden Aufgaben mit dem Dichtebegriff verknüpft. In

der Phase des Sicherns werden auf einem Merktzettel die Würfelvorstellung verbalisiert, benannt und als Antwort auf die Kernfrage präsentiert sowie die zentralen Inhalte der vorherigen Phase unter aktiver Beteiligung der Lernenden dokumentiert. Nach einer Beantwortung der Fragen des Jahrmarktbildes im Plenum kann dann entweder mit der Bearbeitung weiterführender Aufgaben zur Würfelvorstellung in der Phase des Vertiefens begonnen oder zur Erarbeitung der nächsten Grundvorstellung übergeleitet werden.

Während die Phase des Sicherns und des Vertiefens bei der Erarbeitung der Auftriebsvorstellung nahezu identisch verlaufen, werden in den ersten beiden Phasen einige Unterschiede deutlich. So werden in der Phase des Erkundens zunächst die zwei typischen alternativen Vorstellungen zum Schwimmen und Sinken, dass die Masse oder das Volumen entscheiden für das Auftriebsverhalten seien, mithilfe eines Schokoriegelexperiments widerlegt. Das aktive und selbstgesteuerte Entdecken der Auftriebsvorstellung im Sinne des genetischen Prinzips erfolgt dann erst in der Phase des Erschließens anhand einer Simulation und begleitenden Aufgaben. Nach der Erarbeitung aller vier Grundvorstellungen erfolgt die Vernetzung dieser in der letzten Phase. Dazu müssen die Lernenden die Grundvorstellungen anhand komplexer Aufgaben gezielt nutzen und miteinander kombinieren. Konkret wurden zwei solcher komplexen Aufgaben zu den Themen „Lösen von Zucker“ und „Dichteanomalie von Wasser“ entwickelt.

Im Rahmen der Beschreibung der Phasen in Abschnitt 9.2 wurden die verschiedenen Designelemente sowie deren intendierten Funktionsweisen und Bezüge zu den Designprinzipien deutlich. Beispielsweise sollen das Süßigkeitenexperiment und die Würfeldarstellungen (Designelemente) das aktive und selbstständige Entdecken der Würfelvorstellung auf gegenständlicher und bildlicher Ebene fördern (intendierte Funktionsweisen), wodurch das genetische Lernen sowie die Verwendung und der Wechsel verschiedener Darstellungsformen angesprochen wird (Designprinzipien).

Des Weiteren wurden für die konkrete Entwicklung einiger Designelemente weitere Erkenntnisse aus der fach- und allgemeindidaktischen Forschung in Form von verschiedenen Gestaltungskriterien herangezogen. Hierzu zählen etwa Kriterien für die Entwicklung von Simulationen, Kriterien aus der CTML für die Entwicklung

des Erklärvideos oder Kriterien des intelligenten Übens für die Entwicklung der Vertiefungsaufgaben.

Ausschnitte der entwickelten Unterrichtskonzeption und begleitenden Lernmaterialien wurden mithilfe eines Expertinnen- und Expertenreviews, einer Pilotierung sowie zwei Erprobungen im Klassenverband evaluiert und optimiert. Aufgrund der Vielzahl an Optimierungen und Anpassungen wurden nur exemplarisch einzelne Optimierungen präsentiert und auf Basis der Erkenntnisse aus den Erprobungen begründet. Dazu zählen die stärkere Vereinfachung und Strukturierung der Simulation zur Auftriebsvorstellung, die Reduktion von AR-Inhalten zugunsten der Praktikabilität sowie eine stärkere Hervorhebung des Unterschiedes zwischen Masse und Dichte.

11.4 Wirksamkeit und Funktionsweisen der Unterrichtskonzeption mit begleitenden Lernmaterialien

Eine Analyse der Wirksamkeit und Funktionsweise der Unterrichtskonzeption mit begleitenden Lernmaterialien erfolgte in Kapitel 10 unter der folgenden Forschungsfrage:

F3 Inwiefern sind Funktionalität und Wirksamkeit der Unterrichtskonzeption mit begleitenden Lernmaterialien gegeben?

Dazu wurden zwei Erprobungen im Klassenverband mit Ausschnitten aus der Unterrichtskonzeption und der Lernmaterialien durchgeführt.

Die Beantwortung der Frage erfolgte auf Basis der Bearbeitung der Lernmaterialien, der Bewertung der Unterrichtskonzeption mit begleitenden Lernmaterialien durch die Lernenden sowie der Ergebnisse des Prä-Post-(Follow-up)-Vergleichs.

Insgesamt legen die Ergebnisse nahe, dass die Unterrichtskonzeption mit begleitenden Lernmaterialien in Bezug auf die Entwicklung von Grundvorstellungen wirksam sein kann und weitestgehend wie intendiert funktioniert. Dies kann gleichzeitig als eine erste Bewährung der Grundvorstellungen in der Unterrichtsgestaltung und damit als ein weiteres Indiz für die didaktische Relevanz der Grundvorstellungen gesehen werden. Im Folgenden wird auf die Ergebnisse der einzelnen Analysen (Lernmaterialien, Bewertungen und Tests) genauer eingegangen.

11.4.1 Bearbeitung der Lernmaterialien

In Abschnitt 10.2 wurde die Bearbeitung der Lernmaterialien unter der folgenden Forschungsfrage analysiert:

F3.1 Inwiefern bearbeiten die Lernenden die Materialien wie intendiert?

Dazu wurden die bearbeiteten Lernmaterialien anhand einer Musterlösung bepunktet, Plenumsphasen und Videosequenzen deskriptiv analysiert sowie offene Aufgaben induktiv codiert.

Insgesamt zeigten die Ergebnisse, dass die Lernmaterialien weitestgehend wie intendiert bearbeitet wurden. So erreichten bei dem Großteil der Aufgaben mindestens die Hälfte der Lernenden 50 % der Punkte, häufig sogar 75 % oder mehr. Auf Basis der qualitativen Betrachtung der Abweichungen von der intendierten Lösung konnten Erklärungsansätze und Optimierungen formuliert werden, die dieses Ergebnis möglicherweise verbessern könnten.

Weiterhin konnten durch die Analyse der Lernmaterialien Erkenntnisse hinsichtlich der intendierten Funktion spezifischer Designelemente gewonnen werden. Diese sind in der Tabelle 11.2 zusammengefasst.

11.4.2 Evaluation der Unterrichtskonzeption mit begleitenden Lernmaterialien

In Abschnitt 10.3 wurde die Bewertung der Unterrichtskonzeption mit begleitenden Lernmaterialien durch die Lernenden unter der folgenden Forschungsfrage analysiert:

F3.2 Wie bewerten Lernende die Unterrichtskonzeption mit begleitenden Lernmaterialien?

Mithilfe eines Fragebogens wurden dazu verschiedene Bereiche der Unterrichtskonzeption mit begleitenden Lernmaterialien evaluiert, die insgesamt von den Lernenden sehr positiv bewertet wurden:

- Der Schwierigkeitsgrad wurde als angemessen wahrgenommen
- Die Aufgaben, Simulationen und insbesondere die Experimente wurden als unterhaltsam empfunden

- Strukturierungselemente wie die Bebilderung der Versuchsschritte, die häufige Paararbeit und die Besprechungen im Plenum wurden als hilfreich angesehen
- Die Würfel- und Auftriebsvorstellung wurden als verständlich und nützlich wahrgenommen.

Als Verbesserungspotenzial wurde in beiden Erprobungen die Reduktion der Arbeitsblattanzahl und in E2 eine längere Bearbeitungszeit für die Aufgaben gesehen. Zudem konnten anhand der Rückmeldungen der Lernenden Erkenntnisse zu der intendierten Funktion bestimmter Designelemente gewonnen werden (siehe Tabelle 11.2).

11.4.3 Vorstellungsentwicklung

In Abschnitt 10.4 wurde die (langfristige) Vorstellungsentwicklung der Lernenden unter der folgenden Fragestellung betrachtet:

F3.3 Inwiefern initiiert die Intervention (langfristige) Vorstellungsentwicklungen von individuellen Vorstellungen hin zu den normativ formulierten Grundvorstellungen?

Dazu wurde ein Test mit fünf offenen Items entwickelt, in einem Prä-Post-Follow-up-Design durchgeführt und mittels qualitativer Inhaltsanalyse sowie statistischer Tests ausgewertet.

Insgesamt deuteten die signifikanten Lernzuwächse bei den einzelnen Items darauf hin, dass die Intervention eine langfristige Entwicklung der individuellen Vorstellungen hin zu den normativen Grundvorstellungen initiieren kann.

Bezüglich der Auftriebsvorstellung zeigte sich dies darin, dass die Lernenden das Auftriebsverhalten in Fluiden stärker mit der Dichte begründeten und in ihren Begründungen stärker das umgebende Fluid berücksichtigten.

Weiterhin deutete ein Vergleich der Antworten zum Auftrieb in flüssigen Stoffen mit denen in gasförmigen Stoffen darauf hin, dass der Aggregatzustand des Fluids einen Einfluss auf die Begründung des Auftriebsverhaltens haben kann, die Intervention jedoch die Entwicklung der Auftriebsvorstellung für beide Aggregatzustände zu fördern scheint.

Hinsichtlich der Würfelvorstellung zeigte sich die Vorstellungsentwicklung dahingehend, dass mehr Lernende die Invarianz der Dichte gegenüber der Menge eines Stoffes erkennen konnten, einen Dichtewert vermehrt als Masse pro Kubikzentimeter interpretierten sowie verschiedene Aspekte zum Dichtebegriff aufzählten, welche die Würfelvorstellung ansprechen.

Darüber hinaus zeigte eine explorative Triangulation der Testergebnisse mit den Ergebnissen der Artefaktanalyse, dass eine wie intendierte Bearbeitung der Lernmaterialien tendenziell mit größeren Lernzuwächsen einhergeht. Dies unterstützt die Interpretation, dass die Intervention Vorstellungsentwicklungen initiieren kann, und liefert zugleich einen Erklärungsansatz für die teils geringen Lernzuwächse.

11.4.4 Fazit

Das praxisorientierte Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung, Erprobung und Evaluation einer Unterrichtskonzeption mit begleitenden Lernmaterialien, die das Verstehen mathematischer Begriffe im Chemieunterricht fördert und dabei sowohl chemie- als auch mathematikdidaktische Ansätze berücksichtigt. Darüber hinaus wurden mit dem theoretischen Ziel die Gewinnung theoriegenerierender Erkenntnisse über die Funktionsweisen und Wirksamkeit der Unterrichtskonzeption sowie über das Verstehen mathematischer Begriffe im Chemieunterricht angestrebt.

Als grundlegende Ansätze für die Entwicklung der Konzeption wurden die *Entwicklung von Grundvorstellungen* und die *Darstellung der mathematischen Begriffe auf den drei Johnstone-Ebenen* begründet ausgewählt und verfolgt.

In einem ersten Schritt wurden dazu exemplarisch anhand des Dichtebegriffs vier Grundvorstellungen hergeleitet und den Johnstone-Ebenen zugeordnet. Eine erste didaktische Relevanz konnte durch die teilweise Identifikation der Grundvorstellungen bei Lernenden anhand von Lernendeninterviews gezeigt werden.

Anschließend wurde die Unterrichtskonzeption *ma_gic* und dazugehörige Lernmaterialien zur Vermittlung der vier Grundvorstellungen auf Basis von fünf Designprinzipien entwickelt, in Teilen erprobt und optimiert.

Zuletzt wurden Ausschnitte der Unterrichtskonzeption und der Lernmaterialien mithilfe von zwei Erprobungen auf ihre Wirksamkeit und Funktionalität überprüft. Die Wirksamkeit zeigte sich in den teils langfristigen Vorstellungsentwicklungen

der Lernenden, die in dem signifikanten Leistungszuwachs bei der Bearbeitung vorstellungsorientierter Aufgaben zur Dichte ersichtlich wurde. Die Funktionalität spiegelte sich in der überwiegend intendierten Bearbeitung der Lernmaterialien sowie in den positiven Bewertungen der Unterrichtskonzeption durch die Lernenden wider. Dadurch konnten empirische Hinweise auf die intendierte Funktion spezifischer Designelemente gewonnen werden (siehe Tabelle 11.2).

Tabelle 11.2

Übersicht über die empirischen Hinweise auf die Funktionalität der Designelemente der Unterrichtskonzeption

Designelement	Funktionen	Empirische Hinweise ^a
<i>Würfelvorstellung</i>		
Süßigkei- tenexperi- ment	Entdecken der Würfelvorstellung auf gegenständlicher Ebene (DP1, DP2)	+ Mehr als 90 % (90 %) der Lernenden bestimmten korrekt, dass das Lakritzbonbon aus dem „schwersten“ Stoff besteht.
Aufgabe 1b „schwere‘ Stoffe“	Entdecken der Würfelvorstellung auf bildlicher und ggf. symbolischer Ebene (DP1, DP2)	+ Lernende entwickelten vielfältige Lösungsideen zur Kernfrage, die im Wesentlichen der Würfelvorstellung entsprechen. o 58 % (39 %) der Lernenden bestimmten korrekt, dass Nickel aus dem „schwersten“ Stoff besteht.

Designelement	Funktionen	Empirische Hinweise ^a
Erklärvideo mit begleitenden Aufgaben	Verknüpfen der erkundeten Inhalte mit dem Dichtebegriff, u.a. durch das Verbalisieren und Explizieren der Würfelvorstellung (DP5) sowie dem schrittweisen Übersetzen zwischen verschiedenen Darstellungs- und Johnstone-Ebenen (DP2, DP4)	+ Alle Lernenden (60 %) bearbeiteten die Aufgabe zu mindestens 50 % korrekt. Der Median lag bei 88 % (56 %).
Aufgabe 4 „Die Dichte bestimmen“	schrittweises Übersetzen in verschiedene Darstellungs- und Johnstone-Ebenen (DP2, DP4)	+ Etwa 80 % (90 %) der Lernenden bearbeiteten die Aufgabe zu mindestens 50 % korrekt mit abnehmender Lösungshäufigkeit bei ansteigendem Abstraktionsgrad der Darstellungsebene. Der Median lag bei 83 % (83 %)
	Aufgreifen der Verteilvorstellung der Division (DP3)	+ Alle Lernenden (83 %) lösten die vorstellungsorientierte Berechnung der Dichte mithilfe der Verteilvorstellung korrekt.

Designelement	Funktionen	Empirische Hinweise ^a
<i>Auftriebsvorstellung</i>		
Schokoriegelexperiment	Aktivieren und Widerlegen alternativer Vorstellungen durch Auslösen eines kognitiven Konflikts (DP3)	+ 88 % (78 %) der Lernenden vermuteten, dass der Milky Way-Riegel schwimmt, wovon 90 % (79 %) dies damit begründeten, dass er kleiner, leichter oder beides zugleich ist. – 58 % (67 %) der Lernenden vermuteten wider Erwarten, dass das kleinere und leichtere Stück Bounty nicht schwimmt. + 58 % (61 %) der Lernenden stimmten zu oder vollkommen zu, dass sie das Sinken des kleinen und leichten Stück Bountys als überraschend empfanden.

Designelement	Funktionen	Empirische Hinweise ^a
Simulation „Aufsteigen, Schweben und Sinken“	Entdecken der Auftriebsvorstellung (DP1)	+ Etwa 50 % (80-90 %) der Lernenden identifizierten die Dichte als für das Auftriebsverhalten verantwortliche Stoffeigenschaft und formulierten die Regeln zum Aufsteigen, Schweben und Sinken (zu mindestens 50 %) korrekt.
	Aufgreifen und mögliches Widerlegen alternativer Vorstellungen (DP3)	—
	Wechseln zwischen verschiedenen Darstellungsebenen (DP2)	—

Designelement	Funktionen	Empirische Hinweise ^a
<i>Allgemein</i>		
Jahrmarktbild	Anknüpfen an Vorerfahrung der Lernenden (DP3)	+ Lernende formulierten teils Fragen mit Bezug zu Stoffen und Stoffeigenschaften.
		+ Lernende formulierten Erklärungen für Phänomene anhand von Vorerfahrungen.
	Fragen aufwerfen, die an Kernfragen heranhühren und so eine Orientierung für den Lernprozess bieten (DP1)	+ Lernende formulierten zu den Situationen fragen, die unter Anleitung der Lehrkraft retrospektiv mithilfe der gelernten Inhalte beantwortet werden konnten.
		+ 75 % (58 %) der Lernenden stimmte zu oder vollkommen zu, dass das Jahrmarktbild und die Fragen eine gute Orientierung für den Stundenverlauf bieten.
	Überblick über Grundvorstellungen bieten (DP5) und Zusammengehörigkeit dieser verdeutlichen (DP4)	+ 71 % (50 %) der Lernenden stimmten zu oder vollkommen zu, dass das Jahrmarktbild geholfen hat, einen Überblick über die Vorstellungen zur Dichte zu gewinnen.

Designelement	Funktionen	Empirische Hinweise ^a
Reflexionsaufgaben	Anregen zur Reflexion erkundeter Inhalte (DP1, DP3)	+ Problematik des Massenvergleichs und verschiedene Lösungsstrategien der Lernenden konnten erfolgreich im Plenum aufgegriffen werden. + Alternative Vorstellungen konnten mithilfe der Erkenntnisse aus dem Schokoriegelexperiment erfolgreich im Plenum falsifiziert werden.
Merkzettel	Explizites Hervorheben und Sichern der Grundvorstellung – mittels Benennung, Verbalisierung (DP5) und Präsentation als Antwort auf die Kernfrage (DP1) – sowie Hervorheben und Sichern weiterer zentraler Inhalte	+ Mindestens 80 % (100 %) der Lernenden bearbeiteten den Merkwortzettel zu mindestens 50 % korrekt oder korrigierten Lösungen anhand von Besprechungen im Plenum. + 88 % (81 %) der Lernenden stimmten der Aussage zu oder vollkommen zu, dass der Merkwortzettel deutlich macht, was besonders wichtig ist.

Designelement	Funktionen	Empirische Hinweise ^a
Strukturierungselemente	Strukturieren und Unterstützen der genetischen Lernprozesse (DP1)	+ Strukturierungselemente wurden von den Lernenden als hilfreich bewertet, insbesondere die Bebilderung von Versuchsschritten, die Partnerarbeit, die Aufgabenüberschriften und die Besprechungen im Plenum.
Bezeichnung „Würfel-“ und „Auftriebsvorstellung“	Explizites Kommunizieren über Grundvorstellungen ermöglichen (DP5)	+ Mindestens 67 % (61 %) der Lernenden stimmten zu oder vollkommen zu, dass nach der Intervention verständlich ist, was mit der <i>Würfel-</i> und <i>Auftriebsvorstellung</i> gemeint ist. + Nach dem expliziten Hinweis auf die Würfelvorstellung und dem Einzeichnen von Quadraten durch die Lehrkraft stellten die Lernenden bei der Besprechung des Jahrmarktbildes den Zusammenhang zwischen Dichte und Masse eines Kubikzentimeterwürfels her.

Anmerkung. + = bestätigt die Funktion, o = bestätigt die Funktion teilweise, – = bestätigt die Funktion nicht.

^a Prozentangaben ohne Klammern beziehen sich auf E3, Prozentangaben mit Klammern auf E2.

Insgesamt lässt sich mit Bezug zur übergeordneten Forschungsfrage der Arbeit, in welcher Weise das Verstehen mathematischer Begriffe im Chemieunterricht der Sekundarstufe I gefördert werden kann, folgendes festhalten:

Das Verstehen mathematischer Begriffe im Chemieunterricht scheint mithilfe der

Unterrichtskonzeption mag_{ic} und den begleitenden Lernmaterialien durch das Ausbilden von Grundvorstellungen gefördert werden zu können.

Darüber hinaus kann mit der Entwicklung, Erprobung und Evaluation der Unterrichtskonzeption mit begleitenden Lernmaterialien das praxisorientierte Ziel als erreicht betrachtet werden. Das theorieorientierte Ziel wird durch die gewonnenen Erkenntnisse zu Wirksamkeit und Funktionsweisen der Konzeption bereits teilweise erfüllt und im weiteren Verlauf durch die Darstellung des theoretischen Outputs (siehe Kapitel 13) vollständig erreicht.

Die folgende Darstellung des praktischen und theoretischen Outputs dient somit der abschließenden Vertiefung und Erfüllung beider Ziele.

12 Praktischer Output

Den praktischen Output des Projekts stellt die Unterrichtskonzeption *ma_Gic* mit begleitenden Lernmaterialien dar. Ziel dieser Konzeption ist die Vermittlung von Grundvorstellungen zu mathematischen Begriffen im Chemieunterricht am Beispiel der Dichte. Die Unterrichtskonzeption gliedert sich in sechs Phasen, die in Anlehnung an das Strukturmodell der *mathewerkstatt* entwickelt und an anderer Stelle ausführlich beschrieben wurden (siehe Abschnitte 9.2.1, 9.2.3 und 11.3):

1. Fragen

Pro Grundvorstellung:

2. Erkunden

3. Erschließen

4. Sichern

5. Vertiefen

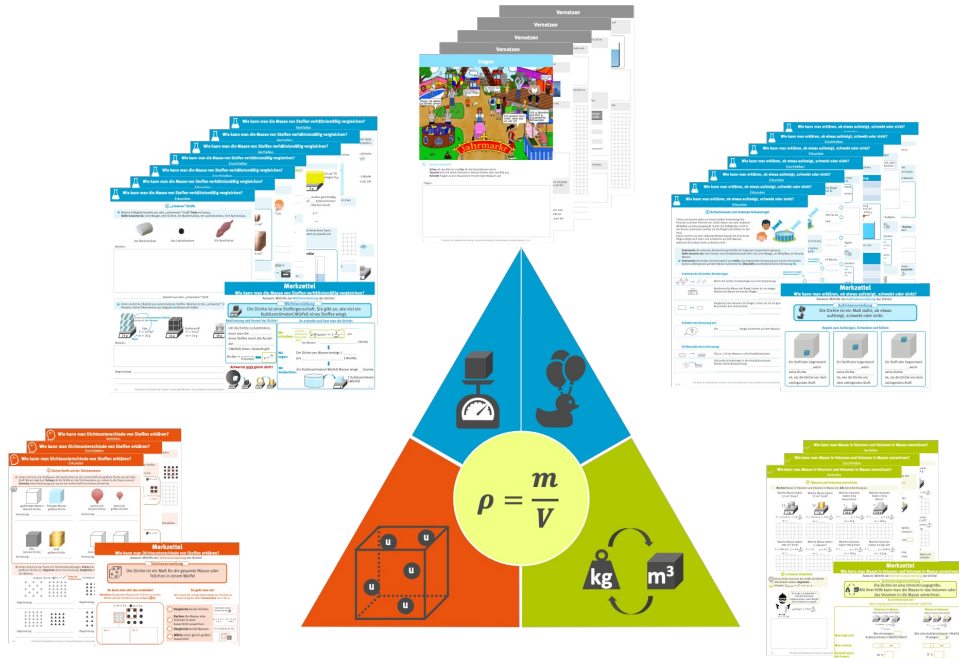
6. Vernetzen

Diese Phasierung entspricht der klassischen Unterrichtsstruktur von Einstieg (Fragen), Erarbeitung (Erkunden und Erschließen), Sicherung (Sichern) und Transfer (Vertiefen und Vernetzen) und sollte daher die Integration des Unterrichtskonzepts in bisherige Unterrichtsstrukturen erleichtern.

Weiterhin wurden konkrete Lernmaterialien zu den jeweiligen Phasen und den vier hergeleiteten Grundvorstellungen zur Dichte entwickelt (siehe Abschnitt 9.2.3 und Anhang B). Eine Übersicht über die verschiedenen Materialien ist in Abbildung 12.1 dargestellt.

Abbildung 12.1

Übersicht über die entwickelten Lernmaterialien



Insgesamt wurden die folgenden Inhalte entwickelt:

- ein Cartoon für die Phase „Fragen“
- 40 (Teil-)Aufgaben inklusive zwei Experimente und ihre digitalen Alternativen zur Erarbeitung der vier Grundvorstellungen, darunter:
 - 13 (Teil-)Aufgaben zur Würfelvorstellung inklusive Experiment und digitale Alternative
 - 13 (Teil-)Aufgaben zur Auftriebsvorstellung inklusive Experiment und digitale Alternative
 - acht (Teil-)Aufgaben zur Teilchenvorstellung
 - sechs (Teil-)Aufgaben zur Umrechnungsvorstellung
- vier Merkzettel zur Sicherung der Grundvorstellungen
- zwei komplexere Aufgaben mit insgesamt neun Teilaufgaben zur Vernetzung der Grundvorstellungen
- eine begleitende Website mit:

- einem Infoblatt zum Umgang mit der Website
- sieben Simulationen
- fünf Videos, darunter ein Erklär- und ein Experimentiervideo
- neun 3D-Modellen
- gestuften Lernhilfen zu 19 (Teil-)Aufgaben
- eine Lehrerhandreichung mit Hinweisen und Erläuterungen zur konkreten Umsetzung des Konzepts, einschließlich einer konkreten Unterrichtsreihe mit Unterrichtsverlaufsplänen zur Erarbeitung aller vier Grundvorstellungen im Umfang von zwei Doppelstunden (je 45 min pro Grundvorstellung; Vertiefungsaufgaben als Hausaufgabe ausgelagert)

Alle Materialien wurden unter der CC-Lizenz veröffentlicht (Link: <https://nawikonzepte.uni-muenster.de/download/magic-material>) und die Arbeitsblätter als PowerPoint-Dateien zur Verfügung gestellt. So können Lehrkräfte die Lernmaterialien kostenfrei verwenden und gezielt auf ihre Lerngruppe anpassen.

Zudem sind die Materialien so gestaltet, dass die Lehrkräfte nach der Erarbeitung der Würfelvorstellung frei entscheiden können, welche weiteren Grundvorstellungen sie in welcher Reihenfolge erarbeiten möchten. Durch diese Flexibilität soll die Zugänglichkeit der Unterrichtskonzeption für Lehrkräfte erhöht werden. Eine idealtypische Reihenfolge für die Vermittlung der Grundvorstellungen wurde auf Basis theoretischer Überlegungen in Abschnitt 8.3 hergeleitet und Lehrkräften als eine mögliche Leitlinie in der Lehrkräftehandreichung zur Verfügung gestellt.

Ausschnitte der Unterrichtskonzeption zur Würfel- und Auftriebsvorstellung wurden zunächst auf Basis mehrerer Erprobungen optimiert (siehe Abschnitt 9.3). Anschließend wurden deren Wirksamkeit und Funktionalität auf Basis von zwei Erprobungen mit insgesamt 42 Lernenden der 7. Jahrgangsstufe evaluiert (siehe Kapitel 10).

Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die Lernenden die Materialien weitestgehend wie intendiert bearbeitet haben und teils langfristige Vorstellungsentwicklungen in Richtung der Grundvorstellungen initiiert werden konnten. Die Funktionalität und Wirksamkeit der Unterrichtskonzeption konnten somit zumindest für die Würfel- und Auftriebsvorstellung bestätigt werden. Weiterhin empfanden sowohl Lernende einer Gesamtschule (E2) als auch Lernende eines Gymnasiums (E3) den Schwie-

rigkeitsgrad als angemessen und die Bearbeitung der Lernmaterialien als unterhaltsam. Dies deutet darauf hin, dass die Unterrichtskonzeption mit begleitenden Lernmaterialien für beide Schulformen geeignet ist.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass die Unterrichtskonzeption *magic* Lehrkräften eine praxistaugliche Intervention zur Vermittlung von Grundvorstellungen zur Dichte bietet. Während die Funktionalität und Wirksamkeit in Teilen empirisch belegt wurde, steht eine Evaluation der gesamten Unterrichtskonzeption und Lernmaterialien noch aus.

13 Theoretischer Output

Im Folgenden wird der theoretische Output der vorliegenden Arbeit präsentiert. Dazu werden unter systematischer Zusammenführung der Erkenntnisse dieser Arbeit Thesen formuliert, die sich drei unterschiedlichen Kategorien zuordnen lassen. Mit „These“ ist hier keine bloße Vermutung gemeint, sondern eine auf den in dieser Arbeit gewonnenen konzeptuellen und empirischen Erkenntnissen begründete, prüfbare und prinzipiell reversible Aussage.

Konzeptuelle Thesen beziehen sich auf die grundlegenden Konzepte dieser Arbeit wie das Johnstone-Dreieck und das Grundvorstellungskonzept. *Lerngegenstandsbezogene Thesen* adressieren den konkreten Lerngegenstand, in diesem Fall den Dichtebegriff. *Designspezifische Thesen* hingegen beziehen sich auf die Designprinzipien und -elemente der entwickelten Unterrichtskonzeption und Lernmaterialien sowie die empirisch gewonnenen Erkenntnisse zu deren Funktionsweisen.

Konzeptuelle Thesen Im Rahmen dieser Arbeit wurden auf Basis des Verfahrensrahmens von Salle und Clüver (2021) vier Grundvorstellungen zur Dichte hergeleitet. Diese konnten anhand von Interviews teilweise bei einzelnen Lernenden identifiziert werden und stellten Erklärungsmodelle für deren Handeln dar. Weiterhin wurde eine Unterrichtskonzeption zur Vermittlung der Grundvorstellungen entwickelt und für die Würfel- und Auftriebsvorstellung erprobt. Ein Prä-Post-Follow-up-Vergleich zeigte eine teils langfristige Vorstellungsentwicklung der individuellen Vorstellungen in Richtung der normativ formulierten Grundvorstellungen.

Insgesamt deutet dies darauf hin, dass das mathematikdidaktische Konzept der Grundvorstellungen erfolgreich auf den mathematisch-chemischen Dichtebegriff übertragen wurde. Die Beschreibung des Dichtebegriffs mithilfe von Grundvorstellungen steht dabei im Einklang mit verschiedenen Ansätzen in der Literatur, die auf die multiplen Bedeutungen des Dichtebegriffs eingehen (Hawkes, 2004; Xu & Clarke, 2012). Ähnliche Ansätze lassen sich auch bei weiteren mathematisch-chemischen

mischen Begriffen, wie etwa der Stoffmenge oder Reaktionsgleichungen, finden (Loeck, 1994; Tullberg, 2005). Unter Berücksichtigung der erfolgreichen Übertragung des Grundvorstellungskonzepts auf den Dichtebegriff lässt sich somit die folgende These formulieren:

Das Grundvorstellungskonzept lässt sich auf mathematisch-chemische Begriffe der Sekundarstufe I übertragen. Das bedeutet, dass zu mathematisch-chemischen Begriffen nicht nur eine, sondern mehrere Vorstellungen existieren, die ein Grundverständnis des Begriffs charakterisieren.

Im Rahmen der Herleitung der Grundvorstellung zur Dichte wurden diese den Johnstone-Ebenen zugeordnet (siehe Abbildung 8.1). Jede Grundvorstellung konnte exakt einer der drei Johnstone-Ebenen zugeordnet werden: zwei Grundvorstellungen der makroskopischen und jeweils eine der submikroskopischen und symbolischen Ebene. Da somit keine eins-zu-eins-Beziehung zwischen Grundvorstellungen und Johnstone-Ebenen vorliegt, lässt sich die folgende These formulieren:

Das Grundvorstellungskonzept für mathematisch-chemische Begriffe ist keine Replikation des Johnstone-Dreiecks, sondern ein eigenständiges Konzept. Es besteht allerdings folgender Zusammenhang zwischen den beiden Konzepten: Jede Grundvorstellung kann einer der drei Johnstone-Ebenen zugeordnet werden (Meyer & Marohn, 2024).

Lerngegenstandsbezogene Thesen Im Rahmen der Herleitung der Grundvorstellungen zur Dichte wurde mithilfe einer QIA von sieben Schulbüchern – unter Berücksichtigung der historischen Entwicklung des Dichtebegriffs und empirischer Erkenntnisse – ein deduktiv-induktives Kategoriensystem entwickelt und mittels Zweitcodierung und Berechnung der Intercoder-Reliabilität überprüft.

Auf Basis der übergeordneten Kategorien (Klassen) dieses Systems wurden die vier Grundvorstellungen zur Dichte abgeleitet, deren jeweilige inhaltliche Facetten durch die Subkategorien beschrieben werden.

Insgesamt stellt das entstandene Kategoriensystem mit den daraus abgeleiteten Grundvorstellungen und deren inhaltlichen Facetten eine umfassende Spezifizierung des Lerngegenstands *Dichte* dar, sodass sich die folgende These formulieren lässt:

Die vier hergeleiteten Grundvorstellungen zur Dichte charakterisieren im Gesamten ein Grundverständnis des Dichtebegriffs. Die Grundvorstellungen umfassen die folgenden inhaltlichen Facetten:

- *Würfelvorstellung:*
 - *Die Dichte als charakteristische Stoffeigenschaft*
 - *Die rechnerische und experimentelle Bestimmung der Dichte*
 - *Die proportionale Beziehung zwischen der Dichte und der Masse*
 - *Die antiproportionale Beziehung zwischen der Dichte und dem Volumen*
- *Auftriebsvorstellung:*
 - *Der Auftrieb in flüssigen Stoffen*
 - *Der Auftrieb in gasförmigen Stoffen*
- *Teilchenvorstellung:*
 - *Die Beziehung zwischen der Dichte und der Teilchennähe*
 - *Die Beziehung zwischen der Dichte und der Teilchenmasse*
 - *Die Beziehung zwischen der Dichte und der Anzahl an Teilchen pro Volumen*
- *Umrechnungsvorstellung:*
 - *Die Umrechnung von Masse zu Volumen*
 - *Die Umrechnung von Volumen zu Masse*

Darüber hinaus konnten spezifische Erkenntnisse zur Auftriebsvorstellung gewonnen werden. Bereits bei den Lernendeninterviews im Rahmen der Herleitung der Grundvorstellungen zeigte sich, dass Lernende das Schwimmen von Objekten in Wasser und das Aufsteigen eines Heliumballons in der Luft jeweils unterschiedlich begründeten. Dies deutete sich ebenfalls bei den Prä-Post-Tests an. Beispielsweise begründeten einige Lernende das Schwimmen eines Holzwürfels mit der Masse, während sie das Aufsteigen eines Heliumballons auf den Stoff selbst zurückführten. Zudem zeigten die Lernenden bei der Beantwortung der Fragen zum Schwimmen und Sinken der Enten auf dem Jahrmarktbild Unsicherheiten bezüglich des Schwe-

bens und der Identifikation des umgebenden Stoffes, die sich bei der Beantwortung der Fragen zu dem Aufsteigen und Sinken der Ballons nicht beobachten ließen. Unter Bezugnahme zu den Ausführungen von Peschel et al. (2021) wurden mögliche Ursachen für diese Beobachtungen angeführt, sodass sich zusammenfassend die folgende These formulieren lässt:

Die Phänomene „Schwimmen im Wasser“ und „Auftrieb in der Luft“ können einen Einfluss auf die Argumentationsweise der Lernenden und damit auf die Anwendung der Auftriebsvorstellung haben. Mögliche Ursachen dafür könnten (a) die Grenzschicht zwischen Wasser und Luft, (b) die scheinbare Ähnlichkeit des Schwimmens mit dem Schweben in einer Flüssigkeit, (c) die gängige Alternativvorstellung „Luft oder Gase besitzen keine Masse“ oder (d) die unterschiedliche Wahrnehmbarkeit der beiden Phänomene im Alltag sein.

Designspezifische Thesen Zur Vermittlung der Grundvorstellungen wurde die Unterrichtskonzeption *magic* mit begleitenden Lernmaterialien entwickelt. Die Entwicklung orientierte sich dabei an fünf begründet ausgewählten Design-Prinzipien, die durch verschiedene Design-Elemente konkretisiert wurden. Die Wirksamkeit der Unterrichtskonzeption hinsichtlich der Vermittlung der Grundvorstellungen konnte in Teilen empirisch gezeigt werden. Daraus lässt sich die folgende These ableiten:

Die ausgewählten Designprinzipien können im Gesamten das Ausbilden von Grundvorstellungen mathematisch-chemischer Begriffe unterstützen.

Zudem konnten bestimmte Funktionsweisen verschiedener Designelemente rekonstruiert werden, auf Basis derer sich nun weitere Thesen ableiten lassen.

So ergab die Analyse der Artefakte, dass einige Lernende ihre Strategie zur Bestimmung des schwereren Stoffes anhand von Würfeldarstellungen (Aufgabe 1b) mithilfe von Würfeln beschrieben. Zudem konnte eine Vielfalt an individuellen Umsetzungen verschiedener Strategien beobachtet werden, welche die Würfelvorstellung der Dichte widerspiegeln. Darüber hinaus wurde in allen Beiträgen zur Reflektionsaufgabe der Würfelvorstellung – in der die Problematik des Massenvergleichs von Stoffen ebenfalls mithilfe von Würfeldarstellungen veranschaulicht wurde – ausschließlich mithilfe von Würfeln anstelle des abstrakten Begriffs des Volumens

formuliert. Zusammen mit den bereits in der Literatur beschriebenen Erkenntnissen (siehe Abschnitt 3.3.3), dass insbesondere die Verwendung bildlicher Darstellungen sowohl sprachlich entlasten als auch den Aufbau von Vorstellungen unterstützen können, lässt sich die folgende These formulieren:

Die Verwendung von ikonischen Würfeldarstellungen kann Lernende bei der aktiven und selbstgesteuerten Entwicklung sowie Formulierung von Lösungsstrategien zur Problematik des Massenvergleichs von Stoffen unterstützen und so die Entwicklung der Würfelvorstellung zur Dichte fördern.

Ergänzend dazu wurden die verwendeten Strategien der Lernenden zur Bestimmung des „schwersten“ Stoffes induktiv codiert. Das dabei entstandene Kategoriensystem wurde mittels Zweitcodierung und Berechnung der Intercode-Reliabilität überprüft. Auf Basis der Erkenntnisse dieses Kategoriensystems, lässt sich die folgende These formulieren:

Die potenziell zielführenden Strategien, die Lernende zur Bestimmung des „schwersten“ Stoffes anhand bildlicher Würfeldarstellungen anwenden, lassen sich wie folgt kategorisieren:

- *Die Lernenden bringen die Stoffe auf das gleiche Volumen, ...*
 - *... das unspezifisch bleibt.*
 - *... das dem eines der gegebenen Stoffe entspricht.*
 - *... das einem Kubikzentimeter entspricht.*
- *Die Lernenden betrachten die Masse und das Volumen eines Stoffes verhältnismäßig ...*
 - *... ohne Bezug zu den anderen Stoffen.*
 - *... mit Bezug zu den anderen Stoffen.*
- *Die Lernenden bringen die Stoffe auf die gleiche Masse,^a ...*
 - *... die unspezifisch bleibt.*
 - *... die der Masse einer der gegebenen Stoffe entspricht.*
 - *... die einem Gramm entspricht.*

^aVon den drei Subkategorien dieser Strategie wurde lediglich die letzte empirisch beobachtet. Die ersten beiden wurden zur systematischen Vollständigkeit in Analogie zur Kategorie „auf das gleiche Volumen bringen“ ergänzt.

In Bezug auf das Jahrmarktbild zeigte sich, dass die Lernenden insbesondere Fragen formulierten, die den Inhalt der Sprechblasen widerspiegeln. Teilweise wurden aber auch darüber hinausgehende Fragen formuliert, die auf eine Integration von Vorwissen über Stoffe und Stoffeigenschaften schließen lassen. Die Fragen konnten nach der Erarbeitung der Grundvorstellungen im Plenum und unter Moderation der Lehrkraft mithilfe der gelernten Inhalte und Grundvorstellungen sowie des Vorwissens der Lernenden beantwortet werden. Darüber hinaus stimmte der Großteil der Lernenden den Aussagen zu, dass das Jahrmarktbild hilft, einen Überblick über die Grundvorstellungen zu gewinnen, und dass es in Kombination mit den Fragen eine gute Orientierung für den Unterrichtsverlauf bietet. Zusammenfassend lässt sich folgende These formulieren:

Das Jahrmarktbild kann die genetische Erarbeitung von Grundvorstellungen unterstützen und rahmen, indem es bei Lernenden Fragen initiiert, die unter Moderation der Lehrkraft retrospektiv mithilfe der gelernten Inhalte und Grundvorstellungen sowie dem Vorwissen von Lernenden beantwortet werden können. Die Inhalte der Sprechblasen scheinen dabei einen maßgeblichen Einfluss auf die Formulierung der Fragen zu haben.

Neben den in den Thesen integrierten Befunden, lassen sich in der bereits in Abschnitt 11.4.4 dargestellten Tabelle 11.2 weitere empirische Hinweise zur Funktionsweise einzelner Designelemente finden. Diese tragen als deskriptive Theorieelemente ebenfalls zum theoretischen Output der Arbeit bei, auch wenn sie nicht im Sinne eigenständiger Thesen ausgeführt sind.

14 Reflexion

14.1 Reflexion der Gütekriterien des DBR-Ansatzes

Im Folgenden wird das gesamte Projekt anhand der in Abschnitt 4.1 formulierten Gütekriterien für DBR-Projekte reflektiert.

Relevanz Die Relevanz des Projekts ergibt sich insbesondere aus dem Aufgreifen eines relevanten Problems aus der Bildungspraxis, mit dem Ziel, einen Beitrag zur Lösung des Problems zu leisten. Dazu wurde einerseits die Relevanz mathematischer Begriffe im Chemieunterricht anhand curricularer, fachdidaktischer und empirischer Erkenntnisse (siehe Abschnitt 1.2) dargelegt. Andererseits wurde die Problematik der Vermittlung dieser Begriffe im Unterricht anhand von Verständnisschwierigkeiten bei Lernenden und dem Mangel an geeigneten Unterrichtskonzepten zur Vermittlung der Begriffe erörtert (siehe Abschnitt 1.4).

Praxisbezug Der Bezug des Projekts zur Bildungspraxis zeigt sich in verschiedenen Punkten. So ergibt sich zunächst einmal der Praxisbezug durch das Aufgreifen eines relevanten Problems aus der Bildungspraxis (siehe Relevanz) sowie die Zielsetzung, eine praxistaugliche Unterrichtskonzeption mit begleitenden Lernmaterialien zur Vermittlung mathematischer Begriffe im Chemieunterricht zu entwickeln.

Dazu wurde die Unterrichtskonzeption in realen Bildungs- statt in Laborsituationen erprobt und optimiert. Lediglich die Erprobung E3 wurde nicht im regulären Chemieunterricht sondern im Institut für Didaktik der Chemie durchgeführt. Dabei wurde allerdings durch beispielsweise die Anordnung der Tische in Reihen versucht, eine möglichst authentische Unterrichtssituation zu schaffen.

Hinsichtlich des Einbezugs von Praxisakteurinnen und Praxisakteuren ist kritisch anzumerken, dass zwar durch die Erprobungen mit Lehrkräften zusammengear-

beitet wurde, jedoch keine systematische Erhebung der Perspektive von aktiven Lehrkräften auf die Unterrichtskonzeption durch beispielsweise Interviews stattgefunden hat. Die Anmerkungen und Wünsche der Lehrkräfte hätten so in die Entwicklung eingebracht werden und die Praxistauglichkeit der Intervention erhöhen können. Allerdings nahmen am Expertinnen- und Expertenreview mehrere Personen teil, die den Vorbereitungsdienst bereits absolviert hatten, sodass ihre Praxiserfahrung in die Weiterentwicklung der Unterrichtskonzeption mit begleitenden Lernmaterialien einfließen konnte. Zudem wurde bei der Entwicklung darauf geachtet, den Einsatz der Unterrichtskonzeption für Lehrkräfte möglichst einfach zu gestalten und so die Praxistauglichkeit zu erhöhen. Dazu gehören:

- Die Entwicklung direkt einsetzbarer Lernmaterialien inklusive Unterrichtsverlaufsplänen und Lehrerhandreichung.
- Das kostenlose Bereitstellen der Materialien per Internet (Link: <https://nawikonzepte.uni-muenster.de/download/magic-material>) und in Form von PowerPoint-Dateien zur individuellen Anpassung dieser an die Lerngruppe.
- Das Bereitstellen digitaler Inhalte über eine geräteunabhängige Website (Link: <https://nawikonzepte.uni-muenster.de/magic>), die gleichzeitig auch lokal gespeichert und offline verwendet werden kann.
- Die nahezu freie wählbare Reihenfolge und Auswahl in der Erarbeitung der Grundvorstellungen.
- Die Anpassung der Unterrichtseinheiten auf 45 Minuten.
- Der Einbezug von Schulbüchern und curricularen Vorgaben bei der Entwicklung der Unterrichtskonzeption mit begleitenden Lernmaterialien.

Kritisch anzumerken ist, dass eine Vermittlung aller vier Grundvorstellungen zur Dichte mindestens zwei Doppelstunden (180 min) umfasst. Üblicherweise wird die Dichte im Chemieunterricht jedoch in nur einer Doppelstunde (90 min) thematisiert, sodass die Unterrichtskonzeption mit begleitenden Lernmaterialien für den Einsatz im Chemieunterricht zu zeitintensiv sein könnte. Die Möglichkeit, einzelne Grundvorstellungen in anderen Fächern oder in späteren Jahrgangsstufen zu thematisieren könnte dieser Herausforderung begegnen. Dennoch wäre eine Kürzung der Lernmaterialien sinnvoll, insbesondere mit Blick auf die Vielzahl an Arbeitsblättern die auch von den Lernenden kritisiert wurde (siehe Abschnitt 10.3).

Theoriebezug Der Theoriebezug wird ebenfalls in mehreren Punkten des Projekts deutlich. Bereits die grundlegende Design-Idee des Projekts, den Ansatz der Grundvorstellungen mit dem Johnstone-Dreieck zu verbinden, stellt eine Kombination zweier zentraler theoretischer Konzepte verschiedener Fachdidaktiken dar und wurde basierend auf theoretischen und empirischen Erkenntnissen dargelegt. So wurde beispielsweise die Ähnlichkeit chemiedidaktischer Ansätze mit dem Grundvorstellungskonzept erörtert (siehe Abschnitt 2.3) und das Johnstone-Dreieck als gemeinsame Basis der Chemie und Mathematik herausgestellt (siehe Abschnitt 1.3).

Weiterhin erfolgte die Auswahl der Designprinzipien auf Grundlage theoretischer und empirischer Erkenntnisse (siehe Abschnitt 9.1). Beispielsweise wurde das Prinzip der Orientierung an individuellen Vorstellungen anhand konstruktivistischer Erkenntnisse begründet ausgewählt.

Auch die konkrete Ausgestaltung einzelner Designelemente erfolgte unter Theoriebezug. So wurden beispielsweise Kriterien des intelligenten Übens für die Gestaltung der Vertiefungsaufgaben oder Prinzipien der CTML zur Entwicklung des Erklärvideos herangezogen.

Darüber hinaus wurden empirische Erkenntnisse möglichst unter Rückbezug zu bestehenden Theorien eingeordnet und Erklärungsansätze daraus abgeleitet. Ein Beispiel ist hier die Einordnung und Erklärung des beobachteten Zurückfallens von Lernenden in ihre ursprüngliche Vorstellung mithilfe von Erkenntnissen der Vorstellungsforschung (siehe Abschnitt 10.4).

Zuletzt wurden im theoretischen Output mehrere Thesen aufgestellt, die einen Bezug zu bestehenden theoretischen Erkenntnissen aufweisen und diese bestätigen oder erweitert haben. Beispielsweise konnte der Nutzen von bildlichen Darstellungen für die Vorstellungsentwicklung bestätigt und das Grundvorstellungskonzept auf mathematische Begriffe im Chemieunterricht erweitert werden.

Designprinzipienorientierung Die Orientierung an Designprinzipien zeigt sich an verschiedenen Stellen im Projektverlauf. So wurden zu Beginn fünf Designprinzipien theoretisch hergeleitet und formuliert, die anschließend mithilfe verschiedener Design-Elemente konkretisiert wurden.

Weiterhin lag bei der Evaluation der Unterrichtskonzeption der Fokus auf den Designprinzipien und -elementen. So wurde beispielsweise bei der Konstruktion des

Fragebogens zur Bewertung der Unterrichtskonzeption gezielt nach spezifischen Wirkungsweisen bestimmter Designelemente, wie etwa dem kognitiven Konflikt im Rahmen des Schokoriegelexperiments gefragt. Zudem wurden im Rahmen der Artefaktanalyse Rückschlüsse auf die Funktionsweisen verschiedener Designelemente gezogen, wie etwa der unterstützenden Funktion der ikonischen Würfeldarstellung bei der Entwicklung und Formulierung von Lösungsstrategien. Auf Basis der empirischen Erkenntnisse zu bestimmten Designelementen wurden dann im theoretischen Output (siehe Kapitel 13) weitere Thesen formuliert.

Designangemessenheit Bezüglich der Designangemessenheit wurden zunächst in Abschnitt 9.2 auf einer theoretisch-argumentativen Ebene Designentscheidungen exemplarisch anhand der Lernmaterialien für die Würfel- und Auftriebsvorstellung dargelegt. Dabei wurde aufgezeigt, inwiefern die einzelnen Designprinzipien durch bestimmte Designelemente realisiert wurden. Ein Beispiel dafür ist die Verwirklichung des genetischen Lernens (DP1) bei der Auftriebsvorstellung mithilfe einer Simulation zum Aufsteigen, Schweben und Sinken.

Die Angemessenheit des Designs konnte zudem in Teilen empirisch belegt werden. So wurden Ausschnitte aus der Unterrichtskonzeption hinsichtlich ihrer Wirksamkeit und intendierten Funktionalität untersucht. Es zeigte sich, dass die Lernmaterialien weitestgehend wie intendiert bearbeitet wurden und eine teils langfristige Vorstellungsentwicklung bei Lernenden in Richtung der Grundvorstellungen initiieren konnten. Dies legt nahe, dass das Design und das Zusammenspiel der Designprinzipien im Gesamten wie intendiert funktioniert sowie wirksam ist und daher als angemessen betrachtet werden kann.

Darüber hinaus konnten empirische Hinweise gewonnen werden, die die intendierte Funktionsweise einzelner Designelemente empirisch bestätigen. Dies zeigt die Angemessenheit der entwickelten Designelemente zur Konkretisierung der Designprinzipien. Beispielsweise zeigte sich bei der Bestimmung des schwersten Stoffes anhand ikonischer Würfeldarstellungen eine Vielfalt an individuellen Lösungsstrategien, die im Kern die Würfelvorstellung widerspiegeln. Dies kann als ein Indiz für ein erfolgreiches genetisches Lernen und damit als eine angemessene Verwirklichung des Designprinzips durch die Aufgabe betrachtet werden.

Kritisch anzumerken ist, dass die Angemessenheit nur für Ausschnitte des Designs evaluiert werden konnte. Dadurch konnte insbesondere das Designprinzip

der sukzessiven Vernetzung von Grundvorstellungen und Johnstone-Ebenen (DP4) kaum evaluiert werden, da Elemente zur Vernetzung der Grundvorstellungen bei der Teilchen- und Umrechnungsvorstellung sowie der Vernetzungsphase zu finden sind. Lediglich hinsichtlich der Vernetzung der Johnstone-Ebenen sind einige wenige Elemente in die Evaluation mit eingeflossen, wie beispielsweise die schrittweise Übersetzung von der makroskopischen zur symbolischen Ebene bei der Bestimmung der Dichte (Aufgabe 4).

Iterativität Das iterative Vorgehen zeigte sich insbesondere bei der Entwicklung der Unterrichtskonzeption. Dazu wurde zunächst ein erster Entwurf der Unterrichtskonzeption mit begleitenden Lernmaterialien entwickelt, der dann in einem iterativen Prozess auf Basis der Erkenntnisse eines Expertinnen- und Expertenreviews, einer Pilotierung sowie mehreren Erprobungen im Klassenverband schrittweise optimiert wurde.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde anhand von exemplarischen Optimierungen der Lernmaterialien ein Einblick in diesen iterativen Prozess gegeben (siehe Abschnitt 9.3).

Dass der Optimierungsprozess noch nicht abgeschlossen ist, zeigen die im Rahmen der Wirksamkeitsanalyse formulierten Optimierungsvorschläge (siehe Abschnitt 10.5), die im weiteren Forschungsverlauf umgesetzt und erneut evaluiert werden müssen.

Innovation Die Innovation des Projekts liegt insbesondere in der grundlegenden Designidee, das Grundvorstellungskonzept auf mathematisch-chemische Begriffe zu übertragen und mit dem Johnstone-Dreieck zu verknüpfen, um so das Verstehen dieser Begriffe zu fördern. Eine Übertragung des Grundvorstellungskonzepts stellt eine grundlegend neue Idee dar, die nach aktuellem Wissensstand auch noch nicht in anderen Naturwissenschaftsdidaktiken formuliert wurde.

Weitere innovative Ansätze zeigen sich bei der Formulierung und konkreten Umsetzung der Designprinzipien. Beispielsweise stellt die Explikation von Grundvorstellungen einen neuen Ansatz dar, der in der Mathematikdidaktik nach aktuellem Wissensstand zwar begrüßt (Lengnink et al., 2011) jedoch noch nicht umgesetzt wurde. Insbesondere durch die Kombination mit dem genetischen Lernen konnte dadurch ein Ansatz zur Vermittlung von Grundvorstellungen entwickelt werden.

Dabei werden die Grundvorstellungen zunächst genetisch erarbeitet und anschließend als explizite Antwort auf die Kernfrage formuliert.

Multiperspektivität Die Multiperspektivität zeigt sich in diesem Projekt dadurch, dass Wissen aus verschiedenen Fachdisziplinen einbezogen wurde. So flossen Erkenntnisse aus der Mathematikdidaktik, wie das Grundvorstellungskonzept, aus der Chemiedidaktik, wie das Johnstone-Dreieck, aus der Sachunterrichtsdidaktik, wie die Alternativvorstellungen zum Schwimmen und Sinken, sowie der Bildungspsychologie, wie die Gestaltungsprinzipien nach der CTML, in die Entwicklung der Unterrichtskonzeption mit begleitenden Lernmaterialien ein.

Darüber hinaus zeigt sich die Multiperspektivität in der Evaluation der entwickelten Unterrichtskonzeption. Verschiedene Erhebungsinstrumente, wie Fragebögen, Tests, Artefakte und Videographien, sowie Auswertungsmethoden, darunter deskriptive und inhaltsanalytische Ansätze sowie statistische Tests, wurden zur Evaluation eingesetzt. Die jeweiligen Ergebnisse wurden falls möglich miteinander kombiniert bzw. trianguliert, um so den gleichen Forschungsgegenstand aus verschiedenen Perspektiven zu betrachten. Beispielsweise wurde das Auslösen eines kognitiven Konflikts mithilfe der Artefakte und Fragebögen analysiert sowie die Testergebnisse mit den Ergebnissen der Artefaktanalyse explorativ trianguliert.

Praktischer und theoretischer Output Den praktischen Output dieses Projekts stellt die Unterrichtskonzeption *maGic* und die dazugehörigen Lernmaterialien zur Vermittlung der Grundvorstellungen zur Dichte dar, die im Gesamten in Kapitel 12 aufgelistet wurden. Die Wirksamkeit und Funktionalität der Konzeption wurde in Teilen empirisch belegt, sodass Lehrkräften eine praxistaugliche Intervention zur Vermittlung der Grundvorstellungen zur Dichte zur Verfügung gestellt werden kann. Dabei ist anzumerken, dass eine Evaluation der gesamten Unterrichtskonzeption noch aussteht.

Der theoretische Output des Projekts wurde in Kapitel 13 dargestellt und umfasst neben empirischen Hinweisen zur Funktionsweise einzelner Designelemente insbesondere die Formulierung konzeptueller, lerngegenstandsbezogener und designspezifischer Thesen. Diese wurden aus Ergebnissen dieser Arbeit und Erkenntnissen aus der Literatur abgeleitet. Die Thesen sind zwar plausibel begründet, benöti-

gen aber weitere empirische Überprüfung und könnten in Zukunft bestätigt, modifiziert oder verworfen werden.

Teile des praktischen und theoretischen Outputs wurden im Rahmen von Tagungen und Veröffentlichungen in die wissenschaftliche Community eingebracht und diskutiert, was als eine erste kommunikative Validierung der Erkenntnisse betrachtet werden kann.

14.2 Reflexion des methodischen Vorgehens

In diesem Abschnitt soll das methodische Vorgehen kritisch analysiert und die Grenzen der Aussagefähigkeit dargelegt werden. Die Strukturierung dieses Abschnitts orientiert sich dabei an der Struktur von Teil V.

Herleitung der Grundvorstellung Die Herleitung der Grundvorstellungen orientierte sich an dem Verfahrensrahmen von Salle und Clüver (2021). Dieser erfolgt zwar kriteriengeleitet, bleibt im Kern jedoch von subjektiven Entscheidungen der Forschenden geprägt (Salle & Clüver, 2021). Daher wurde der Prozess der Herleitung und getroffene Entscheidungen transparent dargestellt, um einen Diskurs über die Grundvorstellungen zu ermöglichen. Die Herleitung der Grundvorstellungen erfolgte auf einer breiten Literaturbasis und mehreren Schulbüchern verschiedener Schulformen, Verlage und Sekundarstufen. Dennoch kann kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben werden, sodass nicht berücksichtigte Literatur oder Schulbücher aus anderen Bundesländern zu einer Modifikation oder Erweiterung der Grundvorstellungen führen könnten.

Die systematische Schulbuchanalyse erfolgte anhand einer QIA in einem deduktiv-induktiven Verfahren regelgeleitet nach (Kuckartz, 2019). Zur Überprüfung der Konsistenz und Zuverlässigkeit des entwickelten Codierleitfadens wurde eine Zweitcodierung in zwei Schritten durchgeführt.

Der erste Schritt des konsensuellen Codierens war zwar zeitaufwendig, half aber, Nicht-Übereinstimmungen zu identifizieren und den Codierleitfaden zu verbessern, wie die gestiegene Intercoder-Reliabilität bei den Erläuterungen zeigt. Die fehlende Verfügbarkeit von Lösungsbüchern hatte eine Erhöhung des interpretativen Spielraums bei der Codierung der Aufgaben zur Folge und beeinträchtigte

möglicherweise die Intercoder-Reliabilität. Dennoch waren die Kappa-Werte auch nach dem zweiten Schritt insgesamt zufriedenstellend, sodass die Codierungen des Erstcodierenden zur Analyse verwendet wurden. Eine weitere Konsensualisierung wäre mit einem unverhältnismäßig hohen Zeitaufwand verbunden gewesen. Da der Fokus der Analyse auf den entwickelten Kategorien statt auf den exakten Codehäufigkeiten lag, ist dieses Vorgehen vertretbar.

Eine erste Bewertung der didaktischen Relevanz erfolgte durch die Identifikation der Grundvorstellungen bei Lernenden im Rahmen von problemzentrierten leitfadengestützten Interviews, die eine geeignete Methode zur Erhebung individueller Vorstellungen darstellen (Krüger et al., 2014). Ebenso kann die Orientierung der Entwicklung der Problemfragen zur Erhebung der Grundvorstellungen an bereits in der Literatur verwendeten Diagnoseinstrumente sowie Schulbuchaufgaben als angemessen betrachtet werden, da diese bereits in die Herleitung der Grundvorstellungen eingeflossen sind.

Kritisch anzumerken ist die Durchführung der Interviews durch die Masterandin anstelle der forschenden Person selbst. So war die Masterandin weniger in das Forschungsprojekt involviert, wodurch teilweise ein gezieltes Nachfragen innerhalb der Interviews ausblieb. Darüber hinaus ist die Identifikation der Grundvorstellungen anhand exemplarisch ausgewählten Kernaussagen der Lernenden kritisch zu betrachten, da dies mögliche Verzerrungen aufgrund individueller Interpretationen der Aussagen zur Folge haben kann.

Zudem ermöglicht die geringe Stichprobengröße keine Verallgemeinerung der Erkenntnisse. Da die Interviews jedoch lediglich einen exemplarischen Eindruck hinsichtlich der didaktischen Relevanz ermöglichen und Erkenntnisse zur Modifikation der Grundvorstellungen liefern sollten, können die genannten Limitationen insgesamt als vertretbar betrachtet werden.

Optimierung der Unterrichtskonzeption Zur Optimierung der Unterrichtskonzeption wurden ein Expertinnen- und Expertenreview, eine Pilotierung sowie zwei Erprobungen im Klassenverband durchgeführt, um mögliche (Verständnis-)Schwierigkeiten im Umgang mit den Lernmaterialien zu identifizieren.

Hinsichtlich des Reviews lässt sich kritisch reflektieren, dass die Expertinnen und Experten am gleichen Institut wie die forschende Person tätig sind, was das Feed-

back durch persönliche Beziehungen beeinflusst haben könnte. Dennoch ist zu berücksichtigen, dass soziale Erwünschtheit auch bei externen Reviews eine Rolle spielen kann. Zudem bot das interne Review die Möglichkeit, den Teilnehmenden bei Bedarf Rückfragen zum Feedback zu stellen.

Ein weiterer Kritikpunkt ist, dass der Zeitrahmen von 90 min teilweise nicht ausreichend war, um die Lernmaterialien zu zwei Grundvorstellungen umfassend zu beurteilen, weshalb sich die Rückmeldungen überwiegend auf die Würfelvorstellung konzentrierten.

Bei der Pilotierung muss berücksichtigt werden, dass die Teilnehmenden und die Art der Bearbeitung der Lernmaterialien (Eigenerarbeitung ohne Plenumsphasen) von der intendierten Zielgruppe und Durchführung abweichen. Die gewonnenen Erkenntnisse sind daher nur bedingt auf die Zielgruppe übertragbar. Dennoch ermöglichte die selbstständige Bearbeitung, spezifische Herausforderungen und Missverständnisse im Umgang mit einzelnen Aufgaben und der Website zu identifizieren.

Bei den Erprobungen im Klassenverband ist kritisch zu reflektieren, dass der Unterricht von einer Praxissemesterstudentin mit begrenzter Unterrichtserfahrung durchgeführt wurde, die im Vergleich zur forschenden Person weniger tief in die Unterrichtskonzeption involviert war. Diese führte den Unterricht jedoch in einem vertrauten Kontext für die Lernenden durch, da sie zuvor mehrfach in den Klassen unterrichtet hatte. Um die Durchführung des Unterrichts möglichst wie intendiert zu gewährleisten, wurde die Studentin in mehreren Treffen von der forschenden Person intensiv gebrieft.

Bezüglich der Datenauswertung ist anzumerken, dass bei der Pilotierung und der Erprobung die Vorcodierung von Schwierigkeiten in den Videoaufnahmen aus pragmatischen Gründen durch eine studentische Hilfskraft erfolgte, anstatt durch die forschende Person selbst. Aufgrund der geringeren Involviertheit der Hilfskraft konnte so potenziellen Verzerrungen durch die forschende Person vorgebeugt werden.

Gleichzeitig besteht jedoch die Möglichkeit, dass dabei einige Schwierigkeiten übersehen wurden. Um dieses Risiko zu minimieren, wurde die Hilfskraft ausdrücklich angewiesen, auch subtile Anzeichen von Missverständnissen bei den Lernenden zu codieren.

Wirksamkeit und Funktionsweise der Unterrichtskonzeption mit begleitenden Lernmaterialien Die Analyse der Wirksamkeit und Funktionsweise der Unterrichtskonzeption erfolgte anhand der Bearbeitung der Lernmaterialien, der Bewertung der Unterrichtskonzeption durch die Lernenden sowie den mithilfe eines Prä-Post-(Follow-up-)Tests ermittelten Lernzuwachses.

Dazu wurden zwei Erprobungen im Klassenverband durchgeführt (E2 & E3), wobei E3 im Rahmen dieser Arbeit als Haupterprobung betrachtet wurde. Diese Entscheidung basiert auf den im Vergleich zu E2 repräsentativeren Rahmenbedingungen, die eine aussagekräftigere Grundlage für die Bewertung der Wirksamkeit der Lernmaterialien bieten. Bei E2 traten hingegen spezifische Schwierigkeiten in der Durchführung auf (siehe Abschnitt 10.1), wie etwa Unterrichtsausfälle, methodische Inkonsistenzen, Störungen während des Post-Tests sowie eine höchstwahrscheinlich vorherige Behandlung des Dichtebegriffs, wie aus den Prä-Post-Tests geschlossen werden konnte. Nichtsdestotrotz wurden die Ergebnisse der Erprobung E2 ergänzend herangezogen, um die Erkenntnisse aus E3 zu validieren und zu kontrastieren. Dieses Vorgehen ist insofern wertvoll, als dass es eine erste Überprüfung der Robustheit der Erkenntnisse aus E3 ermöglicht.

Bezüglich der Generalisierbarkeit der Ergebnisse ist zu beachten, dass diese aufgrund der relativ kleinen Teilnehmendenzahlen von 24 für E3 und 18 für E2 eingeschränkt ist. Diese Werte liegen in den natürlichen Klassengrößen sowie den verfügbaren vollständigen Datensätzen begründet. Daher sollten weitere Erprobungen mit verschiedenen Klassen durchgeführt werden, um die Generalisierbarkeit der Ergebnisse zu erhöhen.

Im Folgenden sollen nun das methodische Vorgehen strukturiert nach den drei Erhebungsinstrumenten reflektiert werden.

Bearbeitung der Lernmaterialien Für die Auswertung der bearbeiteten Lernmaterialien wurden die Lösungen der Lernenden bei den meisten Aufgaben anhand einer zuvor erstellten Musterlösung bewertet. Dabei wurden die individuellen Antworten der Lernenden mit MAXQDA als einzelne Codes festgehalten und entsprechend der Musterlösung bepunktet. Abweichende, aber korrekte oder teilweise korrekte Antworten wurden in die Musterlösung integriert.

Diese Vorgehensweise ermöglichte nicht nur eine zeiteffiziente Bewertung der Lernmaterialien, sondern konnte durch das Festhalten der Antworten in Form von Codes auch einen qualitativen Einblick in typische Abweichungen von der Musterlösung geben. Eine fehlende Intercoder-Überprüfung sowie die Entscheidung über die Ergänzung der Musterlösung bieten Raum für subjektive Verzerrungen. Diese wurden jedoch minimiert, indem die Codes sehr dicht an den tatsächlichen Formulierungen der Lernenden erstellt wurden und eine transparente Dokumentation der Musterlösung erfolgte.

Einige Aufgaben wurden nicht mithilfe einer Musterlösung bewertet, sondern inhaltsanalytisch oder deskriptiv ausgewertet. So wurden die Lösungsstrategien zur Bestimmung des schwersten Stoffes induktiv codiert. Auch hier wurde analog zur Schulbuchanalyse der entwickelte Codierleitfaden durch eine Zweitcodierung in zwei Schritten und Bestimmung der Intercoder-Reliabilität auf seine Zuverlässigkeit und Konsistenz überprüft. Insgesamt konnten auch hier zufriedenstellende Werte erzielt werden und das konsensuelle Codieren erwies sich erneut als zielführend hinsichtlich der Optimierung des Codierleitfadens.

Die Codierung von Ablenkungen hingegen wurde nicht durch eine Zweitcodierung überprüft, was eine potenzielle Anfälligkeit für subjektive Verzerrungen darstellt. Da das Ziel dieser Analyse eine grobe Quantifizierung der Ablenkungszeiten war und eine detailliertere Untersuchung aufgrund fehlender Kameras nicht möglich war, ist dieses Vorgehen vertretbar. Um subjektive Verzerrungen zu minimieren, erfolgte die Codierung anhand klar definierter Kriterien (siehe Anhang C.3) und wurde von einer weniger in das Projekt involvierten studentischen Hilfskraft durchgeführt.

Die fehlenden Kameras erschwerten auch die deskriptive Analyse der Teilaufgabe zur Simulation der Auftriebsvorstellung. Infolgedessen konnte diese Aufgabe nur gruppenweise analysiert werden. Dennoch erwies sich diese Vorgehensweise als nützlich, um einen Einblick in die Bearbeitung der Aufgabe zu erlangen.

Bewertung der Unterrichtskonzeption mit begleitenden Lernmaterialien Die Bewertung der Unterrichtskonzeption durch die Lernenden erfolgte mithilfe eines Fragebogens. Diese Methode ermöglichte eine zeiteffiziente Erhebung der persönlichen Sichtweisen der Lernenden, bringt jedoch Einschränkungen hinsichtlich der

Aussagekraft der Ergebnisse mit sich – insbesondere aufgrund des jungen Alters der Teilnehmenden.

Herausforderungen können unter anderem in Verständnisschwierigkeiten und unterschiedlichen Interpretationen der Items, einer begrenzten Konzentrationsspanne oder einer geringen Einschätzung der Relevanz der Befragung durch jüngere Lernende bestehen. Um diesen Aspekten zu begegnen, wurden die Formulierungen bewusst einfach gehalten, die Ratingskala durch Smileys ergänzt, negativ gepolte Items nur zurückhaltend eingesetzt und jede Variable lediglich mit einem Item erfasst. Letzteres reduziert zwar die Reliabilität, führt aber zu einem sehr kurzen, für die Zielgruppe angemessenen Fragebogen (Döring & Bortz, 2016).

Da der Fragebogen spezifisch zur Bewertung der eigens entwickelten Unterrichtskonzeption konzipiert wurde, mussten die Items eigenständig entwickelt werden. Auf eine umfassende, formale Validierung wurde, wie in Abschnitt 5.2.4 dargelegt, aufgrund der Besonderheiten von Design-Based Research-Projekten verzichtet. Stattdessen wurde eine pragmatische Überprüfung der Verständlichkeit und Passung der Items im Austausch mit der Projektbetreuerin vorgenommen, wodurch Einschränkungen hinsichtlich der Validität gegeben sind. Die Ergebnisse sind daher als kontextbezogene, erste Hinweise auf die Funktionalität der Designelemente zu verstehen.

Lernzuwachs Prä-Post-Test Der Lernzuwachs bzw. die Vorstellungsentwicklung der Lernenden wurde mithilfe eines Prä-Post-(Follow-up-)Tests erfasst. Bezüglich der Testentwicklung ist anzumerken, dass die Items selbst entwickelt wurden, wodurch eine gewisse Unsicherheit hinsichtlich ihrer Validität besteht. Analog zum Fragebogen wurde jedoch eine pragmatische Überprüfung der Verständlichkeit und Passung der Items im Austausch mit der Projektbetreuerin vorgenommen.

Darüber hinaus wurden die Items bereits im Rahmen der Lernendeninterviews (siehe Abschnitt 8.5) eingesetzt, sodass durch die Reaktionen und Bearbeitungsweisen der Lernenden implizit die Verständlichkeit der Items überprüft werden konnte.

Weiterhin ist anzumerken, dass sich die Items hinsichtlich der kognitiven Anforderungen unterscheiden (z. B. freie Wiedergabe von Wissen in Item 3 vs. Anwendung von Wissen in den anderen Items) sowie in ihrer Struktur (z. B. Bildimpuls in Item 1

vs. beschriebene Situation in Item 2) wodurch die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zwischen den Items erschwert ist.

Darüber hinaus wurden aus zeitökonomischen Gründen und zur Verhinderung einer Überforderung der Lernenden nur wenige Items eingesetzt, wodurch die gründliche Erfassung und vollständige Abbildung der Grundvorstellungen nicht möglich war. Beispielsweise fehlten hinsichtlich der Würfelvorstellung Items zur Überprüfung der proportionalen und antiproportionalen Beziehungen zwischen Dichte und Masse bzw. Volumen.

Die Auswertung der Tests erfolgte nach einer vergleichbaren Vorgehensweise wie bei der Auswertung der bearbeiteten Lernmaterialien. So wurden die Antworten der Lernenden induktiv codiert, eine Zweitcodierung in mehreren Schritten durchgeführt und anschließend korrekte und teilweise korrekte Codes mit Punkten versehen. Dies ermöglichte einerseits eine Quantifizierung der Vorstellungsentwicklung und konnte andererseits einen Einblick in die qualitative Entwicklung von Vorstellungen geben.

Hinsichtlich der Bepunktung der Codes ist die Anfälligkeit für subjektive Verzerrungen zu kritisieren. Aus diesem Grund wurde sowohl bei der Ergebnispräsentation die Bepunktung transparent dargelegt, als auch im Anhang eine Übersicht über die Codes und deren Bepunktung beigelegt, um die Intersubjektivität zu erhöhen.

Des Weiteren kann im Allgemeinen das Schließen auf Vorstellungen anhand der richtigen Bearbeitung vorstellungsorientierter Aufgaben und den schriftlichen Antworten der Lernenden kritisch reflektiert werden. So ist das indirekte Schließen auf Vorstellungen auf Basis von Beobachtungen zwar notwendig, jedoch zum einen anfällig für subjektive Verzerrungen und zum anderen abhängig von dem schriftlichen Ausdrucksvermögen der Lernenden (Streller et al., 2019). Demnach wurden die Ergebnisse und Interpretationen transparent dargestellt, um das Schließen auf entsprechende Vorstellungen nachvollziehbar zu machen und die Intersubjektivität zu erhöhen.

Zuletzt ist kritisch zu reflektieren, dass die Lernenden während der Durchführung der Tests nebeneinander saßen. Dies könnte die Unabhängigkeit der Testergebnisse beeinflusst haben. Es wurde zwar auf Abschreiben geachtet, jedoch kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Nähe der Sitzplätze einen Einfluss auf die Antworten der Lernenden hatte.

In Anbetracht der genannten Einschränkungen sind die aus den Testergebnissen abgeleiteten Befunde als explorative, kontextgebundene Hinweise zu interpretieren. Sie dienen als Anhaltspunkte für die Vorstellungsentwicklung in diesen spezifischen Untersuchungsgruppen, erheben jedoch keinen Anspruch auf umfassende Generalisierbarkeit oder psychometrisch gesicherte Ergebnisse.

15 Fazit & Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein erster Schritt in Richtung des Ziels unternommen, das Verständnis mathematischer Begriffe im Chemieunterricht zu fördern, indem exemplarisch anhand des Dichtebegriffs:

1. Das Grundvorstellungskonzept auf mathematische Begriffe im Chemieunterricht übertragen und mit dem Johnstone-Dreieck verknüpft wurde.
2. Die Unterrichtskonzeption *magic* mit begleitenden Lernmaterialien zur Vermittlung von Grundvorstellungen entwickelt und deren Wirksamkeit und Funktionalität in Teilen empirisch belegt wurde.

Insgesamt hat die Arbeit somit einen wesentlichen Beitrag geleistet, um das vielversprechende Grundvorstellungskonzept für mathematische Begriffe im Chemieunterricht fruchtbar zu machen und damit potenziell das Verständnis dieser Begriffe nachhaltig zu fördern.

Aufbauend auf den Erkenntnissen und den identifizierten Grenzen dieser Arbeit ergeben sich vielversprechende Perspektiven für die zukünftige Forschung, um sich diesem Ziel weiter anzunähern.

Eine dieser Perspektiven liegt in der schrittweisen Erweiterung des Grundvorstellungskonzepts auf weitere mathematisch-chemische Begriffe. Zunächst bietet sich die Übertragung auf Begriffe der Sekundarstufe I an, wie die Stoffmenge, die molare Masse, die Stoffmengenkonzentration, das molare Volumen oder den pH-Wert. Diese Untersuchung könnte zudem aufzeigen, ob sich ein allgemeines Grundvorstellungsschema für intensive Größen entwickeln lässt. Eine Übertragung des Grundvorstellungskonzepts auf den Begriff der Reaktionsgleichung wird in einem aktuellen Projekt von Hollwedel und Marohn (2023) erforscht.

In einem weiteren Schritt könnte das Grundvorstellungskonzept auf mathematisch-chemische Begriffe der Sekundarstufe II angewendet werden, wie beispielsweise das Redoxpotenzial und die Nernst-Gleichung.

Im Rahmen der Erweiterung des Konzepts auf weitere mathematisch-chemische Begriffe ist zudem von Interessen, inwiefern die aufgestellte These zur Beziehung zwischen Grundvorstellungen und Johnstone-Ebenen bestätigt wird oder möglicherweise modifiziert werden muss. Lässt sich immer zu jeder Johnstone-Ebene eine Grundvorstellung finden? Gibt es eventuell auch Grundvorstellungen, die sich zu mehreren Johnstone-Ebenen zuordnen lassen?

Darüber hinaus eröffnet sich ein spannendes Forschungsfeld in der Untersuchung, inwieweit das Grundvorstellungskonzept auf mathematische Begriffe in anderen Naturwissenschaften übertragbar ist. Auch eine Verallgemeinerung auf theoretische Begriffe könnte vielversprechend sein, da diese ausschließlich durch unterschiedliche Darstellungen zugänglich. Dadurch könnten sich verschiedene Interpretationen und Bedeutungen des Begriffs und damit verbunden unterschiedliche Vorstellungen ergeben. Als Beispiel wäre hier der theoretische Begriff *Atom* zu nennen, zu dem verschiedene Modelle existieren, wie etwa das Dalton-, Bohr- oder Orbitalmodell, die höchstwahrscheinlich verschiedene mentale Modelle bzw. Vorstellungen initiieren.

Ein weiterer Forschungsbereich liegt in der Vermittlung von Grundvorstellungen und der Unterrichtskonzeption *magic*. So wurden bislang erst Ausschnitte aus der Konzeption evaluiert. Eine vollständige Evaluation steht somit noch aus und sollte in nachfolgenden Forschungsprojekten durchgeführt werden. Neben der Vermittlung der Teilchen- und Umrechnungsvorstellung wäre insbesondere ein Forschungsfokus auf die Vernetzung der Grundvorstellungen und Johnstone-Ebenen (DP4) von Interesse, da dies im Rahmen dieser Arbeit kaum berücksichtigt werden konnte.

Angesichts des im Vergleich zum üblichen Zeitrahmen umfangreichen Zeitaufwands für die Vermittlung der Dichte und der von den Lernenden kritisierten Fülle an Materialien sollte jedoch vorab geprüft werden, inwieweit die Unterrichtskonzeption sinnvoll gekürzt werden kann.

In einem nächsten Schritt sollte unter der Voraussetzung der Übertragbarkeit des Grundvorstellungskonzepts auf weitere mathematisch-chemische Begriffe überprüft werden, inwiefern sich die Unterrichtskonzeption samt der Phasierung und der Designprinzipien auch für die Vermittlung von Grundvorstellungen weiterer Begriffe als fruchtbar erweist oder ggf. modifiziert werden muss.

Ein weiterer interessanter Forschungsfokus ergibt sich aus der These hinsichtlich des unterschiedlichen Einflusses der Phänomene „Schwimmen im Wasser“ und „Auftrieb in der Luft“ auf die Anwendung der Auftriebsvorstellung. Da diese These jedoch auf Erkenntnissen beruht, die durch die verwendeten Items in den Tests hervorgerufen worden sein könnten, sollte die These gezielt mit Hilfe von Tests überprüft werden. Diese sollten mehr als ein Item pro Phänomen enthalten, um den Einfluss der Items auszuschließen und die formulierten möglichen Ursachen für den unterschiedlichen Einfluss der beiden Phänomene weiter einzugrenzen. Beispielsweise sollten für beide Phänomene Items formuliert werden, die das Auftriebsverhalten sowohl innerhalb eines Fluids als auch an einer Grenzschicht berücksichtigen, um Rückschlüsse auf den Einfluss der Grenzschicht ziehen zu können.

Abschließend lässt sich festhalten, dass diese Arbeit nicht nur einen wichtigen Impuls zur Förderung des Verstehens mathematischer Begriffe im Chemieunterricht gegeben, sondern auch mehrere weiterführende Fragestellungen und Entwicklungspotenziale aufgezeigt hat. Diese bieten vielversprechende Anknüpfungspunkte für zukünftige Forschung.

Literaturverzeichnis

- Abels, S., Koliander, B., Plotz, T., & Heidinger, C. (2018). Neon ist ein Gas und hat zwei Ringe: Zur Trennung der makroskopischen und submikroskopischen Ebene des Periodensystems. *CHEMKON*, 25(6), 238–242. <https://doi.org/10.1002/ckon.201800063>
- Adamina, M., & Möller, K. (2010). Zugänge zum naturwissenschaftlichen Lernen öffnen. In P. Labudde (Hrsg.), *Fachdidaktik Naturwissenschaft. 1.-9. Schuljahr* (S. 103–116). Haupt Verlag.
- Ainsworth, S. (1999). The functions of multiple representations. *Computers & Education*, 33(2–3), 131–152. [https://doi.org/10.1016/S0360-1315\(99\)00029-9](https://doi.org/10.1016/S0360-1315(99)00029-9)
- Ainsworth, S. (2008). The educational value of multiple-representations when learning complex scientific concepts. In J. K. Gilbert, M. Reiner & M. Nakhleh (Hrsg.), *Visualization: Theory and Practice in Science Education* (S. 191–208). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5267-5_9
- Akatugba, A. H., & Wallace, J. (1999). Mathematical dimensions of students' use of proportional reasoning in high school physics. *School Science and Mathematics*, 99(1), 31–41. <https://doi.org/10.1111/j.1949-8594.1999.tb17443.x>
- Althoff, J., Barth, M., & Keller, J. (2025). Zur Generierung von Designprinzipien im DBR-Prozess: Theorie- und praxisbasierte Entwicklung einer Entscheidungsmap. *die hochschullehre*, 11(1), 139–152.
- Anderson, L. W., & Krathwohl, D. R. (2001). *A taxonomy for learning, teaching and assessing: A revision of Bloom's taxonomy of educational objectives: Complete edition*. Longman.
- Anderson, T., & Shattuck, J. (2012). Design-based research: A decade of progress in education research? *Educational Researcher*, 41(1), 16–25. <https://doi.org/10.3102/0013189X11428813>

- Archimedes. (2009). On the equilibrium of panes, Book I. In T. L. Heath (Hrsg.), *The Works of Archimedes: Edited in Modern Notation with Introductory Chapters* (S. 189–202). Cambridge University Press.
- Arndt, Barbara, Arnold, K., Dietrich, V., Eberle, A., Hein, A., Kunze, S., Lüttgens, U., Malz, R., Neubacher, T., Pennig, D., Peters, J., & Rehm, H. (2010). *Fokus Chemie. Gymnasium Nordrhein-Westfalen G8 – Gesamtband Sekundarstufe I*. Cornelsen.
- Asselborn, W., Dreßel, B., Risch, K. T., & Sieve, B. F. (2017). *Chemie heute SI*. Schroedel.
- Asselborn, W., Jäckel, M., & Risch, K. T. (2013). *Chemie heute SII Gesamtband*. Schroedel.
- Assis, A. K. T. (2010). *Archimedes the center of gravity and the first law of mechanics: The law of the lever*. Apeiron.
- Aßmus, D. (2013). Fähigkeiten im analogen Denken bei mathematisch begabten Kindern. *mathematica didactica*, 28–44. <https://doi.org/10.18716/OJS/MD/2013.1109>
- Atkinson, R., & Shiffrin, R. (1968). Human memory: A proposed system and its control processes. In *Psychology of Learning and Motivation* (S. 89–195). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0079-7421\(08\)60422-3](https://doi.org/10.1016/S0079-7421(08)60422-3)
- Ault, A. (2001). How to say how much: Amounts and stoichiometry. *Journal of Chemical Education*, 78(10), 1347. <https://doi.org/10.1021/ed078p1347>
- Baalmann, W., Frerichs, V., Weitzel, H., Gropengießer, H., & Kattmann, U. (2004). Schülervorstellungen zu Prozessen der Anpassung: Ergebnisse einer Interviewstudie im Rahmen der Didaktischen Rekonstruktion. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 10, 7–28.
- Bake, J.-H., & Wloka, K. (2015). Reaktionsschemata verstehen: Von der Teilchenformel zur Stöchiometrie. *Praxis der Naturwissenschaften - Chemie in der Schule*, 64(2), 20–23.
- Banse, C. (2025, 30. Januar). *Nachhaltigkeit bewerten mithilfe einer Bewertungsscheibe: Entwicklung einer Konzeption für den naturwissenschaftlichen Unterricht am Beispiel Elektromobilität*. Logos Verlag Berlin. <https://doi.org/10.30819/5895>

- Barke, H.-D., Harsch, G., Kröger, S., & Marohn, A. (2018). *Chemiedidaktik kompakt*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-56492-9>
- Barke, H.-D., & Indriyanti, N. Y. (2017). Das Molkonzept durch Experiential Learning: Eine empirische Studie zum Chemieunterricht in Deutschland und Indonesien. *CHEMKON*, 24(2), 64–68. <https://doi.org/10.1002/ckon.201710289>
- Barzel, B., Hußmann, S., Leuders, T., & Prediger, S. (2012). Nachhaltig lernen durch aktives Systematisieren und Sichern: Konzept und Umsetzung in der mathematikwerkstatt. *Beiträge zum Mathematikunterricht 2012*, 93–96.
- Barzel, B., Prediger, S., Leuders, T., & Hußmann, S. (2011). Kontexte und Kernprozesse: Ein theoriegeleitetes und praxiserprobtes Schulbuchkonzept. In *Beiträge zum Mathematikunterricht* (S. 71–74).
- Baur, N., & Blasius, J. (Hrsg.). (2022). *Handbuch Methoden der empirischen Sozialforschung*. Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-37985-8>
- Beck, U., Markic, S., & Eilks, I. (2010). Modellierungsaufgaben im Chemieunterricht. *Praxis der Naturwissenschaften - Chemie in der Schule*, 59(6), 5–8.
- Becker, K., & Park, K. (2011). Effects of integrative approaches among science, technology, engineering, and mathematics (STEM) subjects on students' learning: A preliminary meta-analysis. *Journal of STEM Education: Innovations & Research*, 12, 23–37.
- Beerenwinkel, A., & Parchmann, I. (2010). Ansätze zur Berücksichtigung von Lernervorstellungen in Lehrtexten und Schulbüchern zum kontextorientierten Lernen. *Beiträge zur Lehrerbildung*, 28(1), 62–72. <https://doi.org/10.25656/01:13732>
- Beerenwinkel, A., Parchmann, I., & Gräsel, C. (2007). Chemieschulbücher in der Unterrichtsplanung: Welche Bedeutung haben Schülervorstellungen? *CHEMKON*, 14(1), 7–14. <https://doi.org/10.1002/ckon.200710051>
- Ben-Chaim, D., Fey, J. T., Fitzgerald, W. M., Benedetto, C., & Miller, J. (1998). Proportional reasoning among 7th grade students with different curricular experiences. *Educational Studies in Mathematics*, 36(3), 247–273. <https://doi.org/10.1023/A:1003235712092>

- Blum, W., & vom Hofe, R. (2003). Welche Grundvorstellungen stecken in der Aufgabe? Sekundarstufe I, 5.-7. Schuljahr. *Mathematik lehren*, (118), 14–18.
- Blum, W., vom Hofe, R., Jordan, A., & Kleine, M. (2004). Grundvorstellungen als aufgabenanalytisches und diagnostisches Instrument bei PISA. In M. Neubrand (Hrsg.), *Mathematische Kompetenzen von Schülerinnen und Schülern in Deutschland* (S. 145–157). VS Verlag für Sozialwissenschaften. https://doi.org/10.1007/978-3-322-80661-1_8
- Bodner, G. M., & Herron, J. D. (2002). Problem-solving in chemistry. In J. K. Gilbert, O. de Jong, R. Justi, D. F. Treagust & J. H. Van Driel (Hrsg.), *Science & Technology Education Library* (S. 235–266). Kluwer Academic Publishers. https://doi.org/10.1007/0-306-47977-x_11
- Borrows, P., Vincent, R., & Cochrane, A. (1998). Teaching safety: Using mole calculations to teach aspects of safety in post-16 chemistry. *School Science Review*, 79(288), 67–70.
- Bortz, J., Lienert, G. A., & Boehnke, K. (2008). *Verteilungsfreie Methoden in der Biostatistik* (3. Auflage). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-74707-9>
- Bortz, J., & Schuster, C. (2010). *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler* (7. Auflage). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-12770-0>
- BouJaoude, S., & Barakat, H. (2000). Secondary school students' difficulties with stoichiometry. *School Science Review*, 81(296), 91–98.
- BouJaoude, S., Salloum, S., & Abd-El-Khalick, F. (2004). Relationships between selective cognitive variables and students' ability to solve chemistry problems. *International Journal of Science Education*, 26(1), 63–84. <https://doi.org/10.1080/0950069032000070315>
- Brennan, R. L., & Prediger, D. J. (1981). Coefficient kappa: Some uses, misuses, and alternatives. *Educational and Psychological Measurement*, 41(3), 687–699. <https://doi.org/10.1177/001316448104100307>
- Brown, A. L. (1992). Design experiments: Theoretical and methodological challenges in creating complex interventions in classroom settings. *The Journal of the Learning Sciences*, 2(2), 141–178. Verfügbar 17. März 2023 unter <http://www.jstor.org/stable/1466837>

- Brückl, E., Eisner, W., Laitenberger, K., Liebenow, K., Mihlan, M., Nickolay, H., Peppmeier, R., Preitschaft, C., Schaschke, H., Schierle, W., Schmidt, B., Schuck, A., Stein-Bastuck, R., Sternberg, M., Töhl-Borsdorf, J., Zehentmeier, P., & Zippel, T. (2011). *Elemente Chemie 2. Oberstufe*. Klett.
- Brühwiler, C., Helmke, A., & Schrader, F.-W. (2017). Determinanten der Schulleistung. In M. K. Schweer (Hrsg.), *Lehrer-Schüler-Interaktion* (S. 291–314). Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-15083-9_13
- Bruner, J. S., Olver, R. R., & Greenfield, P. M. (1971). *Studien zur kognitiven Entwicklung: Eine kooperative Untersuchung am "Center for Cognitive Studies" der Harvard-Universität* (H. Aebli, Hrsg.; G. Juzi, Übers.; 1. Auflage). Ernst Klett Verlag.
- Camacho, M., & Good, R. (1989). Problem solving and chemical equilibrium: Successful versus unsuccessful performance. *Journal of Research in Science Teaching*, 26(3), 251–272. <https://doi.org/10.1002/tea.3660260306>
- Cepriá, G., & Salvatella, L. (2014). General procedure for the easy calculation of pH in an introductory course of general or analytical chemistry. *Journal of Chemical Education*, 91(4), 524–530. <https://doi.org/10.1021/ed400089j>
- Chandler, P., & Sweller, J. (1992). The split-attention effect as a factor in the design of instruction. *British Journal of Educational Psychology*, 62(2), 233–246. <https://doi.org/10.1111/j.2044-8279.1992.tb01017.x>
- Chandrasegaran, A. L., Treagust, D. F., Waldrup, B. G., & Chandrasegaran, A. (2009). Students' dilemmas in reaction stoichiometry problem solving: Deducing the limiting reagent in chemical reactions. *Chem. Educ. Res. Pract.*, 10(1), 14–23. <https://doi.org/10.1039/b901456j>
- Chinn, C. A., & Brewer, W. F. (1993). The role of anomalous data in knowledge acquisition: A theoretical framework and Implications for science instruction. *Review of Educational Research*, 63(1), 1–49. <https://doi.org/10.3102/00346543063001001>
- Cobb, P., Confrey, J., diSessa, A., Lehrer, R., & Schauble, L. (2003). Design experiments in educational research. *Educational Researcher*, 32(1), 9–13. <https://doi.org/10.3102/0013189X032001009>

- Collins, A. (1992). Toward a design science of education. In E. Scanlon & T. O'Shea (Hrsg.), *New Directions in Educational Technology* (S. 15–22). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-77750-9_2
- Collins, A., Joseph, D., & Bielaczyc, K. (2004). Design research: Theoretical and methodological issues. *Journal of the Learning Sciences*, 13(1), 15–42. https://doi.org/10.1207/s15327809jls1301_2
- Conover, W., & Iman, R. (1979). *Multiple-comparisons procedures. Informal report* (LA-7677-MS, 6057803). Los Alamos Scientific Lab. New Mexico. <https://doi.org/10.2172/6057803>
- Conover, W. J., & Conover, W. J. (1999). *Practical nonparametric statistics* (3. Auflage). Wiley.
- Corradi, D., Elen, J., & Clarebout, G. (2012). Understanding and enhancing the use of multiple external representations in chemistry education. *Journal of Science Education and Technology*, 21(6), 780–795. <https://doi.org/10.1007/s10956-012-9366-z>
- Cracolice, M. S., Deming, J. C., & Ehlert, B. (2008). Concept learning versus problem solving: A cognitive difference. *Journal of Chemical Education*, 85(6), 873. <https://doi.org/10.1021/ed085p873>
- Cramer, K., & Post, T. (1993). Proportional reasoning. *The Mathematics Teacher*, 86(5), 404–407. Verfügbar 7. Juli 2023 unter <https://www.jstor.org/stable/27968390>
- Dahsah, C., & Coll, R. K. (2008). Thai grade 10 and 11 students' understanding of stoichiometry and related concepts. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 6(3), 573–600. <https://doi.org/10.1007/s10763-007-9072-0>
- Davidowitz, B., Chittleborough, G., & Murray, E. (2010). Student-generated submicro diagrams: A useful tool for teaching and learning chemical equations and stoichiometry. *Chem. Educ. Res. Pract.*, 11(3), 154–164. <https://doi.org/10.1039/c005464j>
- De Lima, K. M. G., Da Silva, Á. R. L., De Souza, J. P. F., Das Neves, L. S., & Gasparotto, L. H. S. (2014). Determination of Al content in commercial samples through stoichiometry: A simple experiment for an advanced high-school chemistry olympiad preparatory course. *Journal of Chemical Education*, 91(9), 1473–1476. <https://doi.org/10.1021/ed400683r>

- de Jong, T., & Lazonder, A. W. (2014). The guided discovery learning principle in multimedia learning. In R. E. Mayer (Hrsg.), *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning* (2. Aufl., S. 371–390). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139547369.019>
- de Jong, T., & Van Joolingen, W. R. (1998). Scientific discovery learning with computer simulations of conceptual domains. *Review of Educational Research*, 68(2), 179–201. <https://doi.org/10.3102/00346543068002179>
- Dellbrügge, B. (2020). *Choice2interact: Interaktiv Lernen mit Tablets im Chemieunterricht*. Logos Verlag.
- Denny, R. T. (1971). The mathematics skill test (MAST) for chemistry. *Journal of Chemical Education*, 48(12), 845. <https://doi.org/10.1021/ed048p845>
- Dierks, W., Weninger, J., & Herron, J. D. (1985). Mathematics in the chemistry classroom: Part 1: The special nature of quantity equations. *Journal of Chemical Education*, 62(10), 839. <https://doi.org/10.1021/ed062p839>
- DIN. (1971). *DIN 1306:1971-12, Dichte: Begriffe*.
- Dinkelager, J. (2016). Datengewinnung und -formate in der videobasierten Unterrichtsforschung. In U. Rauin, M. Herrle & T. Engartner (Hrsg.), *Videoanalysen in der Unterrichtsforschung: methodische Vorgehensweisen und Anwendungsbeispiele*. Beltz Juventa.
- Dori, Y. J., & Hameiri, M. (1998). The 'Mole Environment' studyware: Applying multidimensional analysis to quantitative chemistry problems. *International Journal of Science Education*, 20(3), 317–333. <https://doi.org/10.1080/0950069980200305>
- Döring, N., & Bortz, J. (2016). *Forschungsmethoden und Evaluation in den Sozial- und Humanwissenschaften* (5. vollständig überarbeitete, aktualisierte und erweiterte Auflage 2016). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-41089-5>
- Dresing, T., & Pehl, T. (2018). *Praxisbuch Interview, Transkription & Analyse: Anleitungen und Regelsysteme für qualitativ Forschende* (8. Auflage). Eigenverlag.
- Duit, R. (1995). Zur Rolle der konstruktivistischen Sichtweise in der naturwissenschaftsdidaktischen Lehr- und Lernforschung. *Zeitschrift für Pädagogik*, 41(6), 905–923. <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0111-pedocs-105369>

- Duit, R., & Treagust, D. F. (2003). Conceptual change: A powerful framework for improving science teaching and learning. *International Journal of Science Education*, 25(6), 671–688. <https://doi.org/10.1080/09500690305016>
- Duval, R. (2006). A cognitive analysis of problems of comprehension in a learning of mathematics. *Educational Studies in Mathematics*, 61(1–2), 103–131. <https://doi.org/10.1007/s10649-006-0400-z>
- Egbers, M. (2017, 23. Juli). *Konzeptentwicklungs- und Gesprächsprozesse im Rahmen der Unterrichtskonzeption choice2learn*. Logos Verlag. <https://doi.org/10.30819/4510>
- Eid, M., Gollwitzer, M., & Schmitt, M. (2011). *Statistik und Forschungsmethoden: Lehrbuch. Mit Online-Materialien* (2. Auflage). Beltz.
- Eisner, W., Gietz, P., Justus, A., Laitenberger, K., Nickolay, H., Schierle, W., Schmidt, B., Sternberg, M., & Zippel, T. (2011). *Elemente Chemie 1*. Klett.
- Engstler, V., & Marohn, A. (2025). Kann mit Escape Games Erkenntnisgewinnung gefördert werden? In H. van Vorst (Hrsg.), *Entdecken, lehren und forschen im Schülerlabor. Jahrestagung in Bochum 2024* (S. 485–488). Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik.
- Euler, D. (2017). Design principles as bridge between scientific knowledge production and practice design. *Educational Design Research*, 1(1). <https://doi.org/10.15460/eder.1.1.1024>
- Euler, D. (2022). Diskussion des Beitrags von Gabi Reinmann „Was macht Design-Based Research zu Forschung? Die Debatte um Standards und die vernachlässigte Rolle des Designs“. *EDeR. Educational Design Research*, 6(2), 1–9. <https://doi.org/10.15460/eder.6.2.1952>
- Euler, D., & Sloane, P. F. E. (Hrsg.). (2014a). *Design-Based Research* (1. Auflage). Franz Steiner Verlag.
- Euler, D., & Sloane, P. F. E. (Hrsg.). (2014b). Design-Research: A paradigm under development. In *Design-Based Research* (1. Auflage, S. 15–44). Franz Steiner Verlag.
- Fach, M., De Boer, T., & Parchmann, I. (2007). Results of an interview study as basis for the development of stepped supporting tools for stoichiometric problems. *Chem. Educ. Res. Pract.*, 8(1), 13–31. <https://doi.org/10.1039/b6rp90017h>

- Fach, M., de Boer, T., Endres, W., & Parchmann, I. (2006). Mathematik als Brücke zwischen Stoff- und Teilchenbetrachtungen. In A. Pitton (Hrsg.), *Tagungsband zur Jahrestagung der Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik (GDChP) 2005. Lehren und Lernen mit neuen Medien* (S. 281–283). LIT Verlag.
- Fach, M., Endres, W., & Parchmann, I. (2006). Bausteine und Stöchiometrie: Erste quantitative Betrachtungen chemischer Reaktionen. *Naturwissenschaften im Unterricht. Chemie*, 17(94–95), 26–31.
- Fassouloupoulos, G., Kariotoglou, P., & Koumaras, P. (2003). Consistent and inconsistent pupils' reasoning about intensive quantities: The case of density and pressure. *Research in Science Education*, 33(1), 71–87. <https://doi.org/10.1023/A:1023658419034>
- Felty, W. L. (1978). Intuitive and general approach to acid-base equilibrium calculations. *Journal of Chemical Education*, 55(9), 576. <https://doi.org/10.1021/ed055p576>
- Feulner, B., Hiller, J., & Servene, P. (2021). Design-Based Research in der Geographiedidaktik: Kernelemente, Verlaufsmodell und forschungsmethodologische Besonderheiten anhand vier ausgewählter Forschungsprojekte. *EDeR. Educational Design Research*, 5(2), 1–32. <https://doi.org/10.15460/eder.5.2.1576>
- Fiebig, S., & Melle, I. (2001). "Problemthemen" des Chemieunterrichts in der Sekundarstufe I: Gegenwärtige Situation und fachdidaktische Konsequenzen. *CHEMKON*, 8(4), 199–202. <https://doi.org/10.1002/ckon.200100005>
- Flinga. (n. d.). Verfügbar 30. Juni 2025 unter <https://flinga.fi>
- Forschergruppe Kassel. (2004). Aufgaben mit gestuften Lernhilfen. *Lernchancen*, 42, 38–43.
- Franke-Braun, G., Schmidt-Weigand, F., Stäudel, L., & Wodzinski, R. (2008). Aufgaben mit gestuften Lernhilfen: Ein Aufgabenformat zur Förderung der sachbezogenen Kommunikation und Lernleistung für den naturwissenschaftlichen Unterricht. In K. Forschergruppe (Hrsg.), *Lernumgebungen auf dem Prüfstand: Zwischenergebnisse aus den Forschungsprojekten* (241 S.). Logos.

- Gabel, D. L., & Sherwood, R. D. (1980). Effect of using analogies on chemistry achievement according to piagetian level. *Science Education*, 64(5), 709–716. <https://doi.org/10.1002/sce.3730640516>
- Gabel, D. L., & Sherwood, R. D. (1983). Facilitating problem solving in high school chemistry. *Journal of Research in Science Teaching*, 20(2), 163–177. <https://doi.org/10.1002/tea.3660200207>
- Gauchon, L., & Méheut, M. (2007). Learning about stoichiometry: From students' preconceptions to the concept of limiting reactant. *Chem. Educ. Res. Pract.*, 8(4), 362–375. <https://doi.org/10.1039/b7rp90012k>
- Gebhard, U., Höttecke, D., & Rehm, M. (2017). *Pädagogik der Naturwissenschaften*. Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-531-19546-9>
- Gennaro, E. D. (1981). Assessing junior high students' understanding of density and solubility. *School Science and Mathematics*, 81(5), 399–404. <https://doi.org/10.1111/j.1949-8594.1981.tb09996.x>
- Gerstenmaier, J., & Mandl, H. (1995). Wissenserwerb unter konstruktivistischer Perspektive. *Zeitschrift für Pädagogik*, 41(6), 867–888. <https://doi.org/10.25656/01:10534>
- Gietz, P., Kasprzak, T., Knetsch, R., Peppmeier, R., & Schäpers, B. (2014). *Prisma Chemie 1/2*. Klett.
- Gilbert, J. K., & Treagust, D. (Hrsg.). (2009). *Multiple representations in chemical education* (Bd. 4). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8872-8>
- Gilbert, J. K., & Treagust, D. F. (2009). Introduction: Macro, submicro and symbolic representations and the relationship between them: Key models in chemical education. In J. K. Gilbert & D. Treagust (Hrsg.), *Multiple Representations in Chemical Education* (S. 1–8). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8872-8_1
- Gizara, J. M. (1981). Bridging the stoichiometry gap. *The Science Teacher*, 48(4), 36–37. Verfügbar 10. Juli 2025 unter <http://www.jstor.org/stable/24133819>
- Goldhausen, I., & Di Fuccia, D.-S. (2015). *Mathematische Modelle im Chemieunterricht* (Diss.). Universität Kassel. Kassel.

- Goldhausen, I., & Di Fuccia, D.-S. (2021). Mathematisches Modellieren im Chemieunterricht. *CHEMKON*, 28(7), 282–293. <https://doi.org/10.1002/ckon.201900075>
- González-Sánchez, A. M., Ortiz-Nieves, E. L., & Medina, Z. (2014). A hands-on activity incorporating the threefold representation on limiting reactant. *Journal of Chemical Education*, 91(9), 1464–1467. <https://doi.org/10.1021/ed4003783>
- Gorodetsky, M., & Gussarsky, E. (1986). Misconceptualization of the chemical equilibrium concept as revealed by different evaluation methods. *European Journal of Science Education*, 8(4), 427–441. <https://doi.org/10.1080/0140528860080409>
- Gravemeijer, K., & Cobb, P. (2006). Design research from a learning design perspective. In J. Akker, K. Gravemeijer, S. McKenney & N. Nieveen (Hrsg.), *Educational Design Research* (S. 45–85). Taylor and Francis Ltd.
- Greefrath, G., Oldenburg, R., Siller, H.-S., Ulm, V., & Weigand, H.-G. (2016). *Didaktik der Analysis*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-48877-5>
- Greefrath, G., & Ulm, V. (2021). Integral: Grundvorstellungen dynamisch visualisiert. *Mathematik lehren*, 224, 36–40.
- Griesel, H., vom Hofe, R., & Blum, W. (2019). Das Konzept der Grundvorstellungen im Rahmen der mathematischen und kognitionspsychologischen Begrifflichkeit in der Mathematikdidaktik. *Journal für Mathematik-Didaktik*, 40(2), 123–133. <https://doi.org/10.1007/s13138-019-00140-4>
- Gropengießer, H., & Marohn, A. (2018). Schülervorstellungen und Conceptual Change. In D. Krüger, I. Parchmann & H. Schecker (Hrsg.), *Theorien in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung* (S. 49–67). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-56320-5_4
- Grüß-Niehaus, T., & Schanze, S. (2010). Lernervorstellungen zum Dichte-Begriff. *CHEMKON*, 17(2), 71–74. <https://doi.org/10.1002/ckon.201010113>
- Gulacar, O., Bowman, C. R., & Feakes, D. A. (2013). Observational investigation of student problem solving: The role and importance of habits. *Science Education International*, 24(2), 344–360.

- Haas, J.-B. (2021). *chem.LEVEL: fachsprachlich sensibler Chemieunterricht auf Basis des Johnstone Dreiecks*. Logos.
- Haas, J.-B., & Marohn, A. (2022). The teaching concept chem.LEVEL: Promoting technical language on the basis of the Johnstone triangle. *CHEMKON*, 29(S1), 213–217. <https://doi.org/10.1002/ckon.202100092>
- Hänze, M., Schmidt-Weigand, F., & Stäudel, L. (2010). Gestufte Lernhilfen. In S. Boller, R. Lau, S. Bathe, R. Bernard, A. Kemper & M. Wäcken (Hrsg.), *Individuelle Förderung durch Innere Differenzierung. Ein Praxishandbuch für Lehrerinnen und Lehrer der Sekundarstufe II* (S. 63–73). Beltz.
- Hardy, I., Jonen, A., Möller, K., & Stern, E. (2006). Effects of instructional support within constructivist learning environments for elementary school students' understanding of "floating and sinking." *Journal of Educational Psychology*, 98(2), 307–326. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.98.2.307>
- Hartmann, R. (2024). *Grundvorstellungen im Chemieunterricht: Lernprozesse von Schülerinnen und Schülern bei der Bearbeitung von Lernmaterialien zum Dichtebegriff* (Masterarbeit). Universität Münster.
- Hashweh, M. Z. (2016). The complexity of teaching density in middle school. *Research in Science & Technological Education*, 34(1), 1–24. <https://doi.org/10.1080/02635143.2015.1042854>
- Hawkes, S. J. (2004). The concept of density. *Journal of Chemical Education*, 81(1), 14. <https://doi.org/10.1021/ed081p14>
- Heller, B. (1970). *Grundbegriffe der Physik im Wandel der Zeit*. Vieweg+Teubner Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-663-01916-9>
- Herrle, M., & Breitenbach, S. (2016). Planung, Durchführung und Nachbereitung videogestützter Beobachtungen im Unterricht. In U. Rauin, M. Herrle & T. Engartner (Hrsg.), *Videoanalysen in der Unterrichtsforschung: methodische Vorgehensweisen und Anwendungsbeispiele*. Beltz Juventa.
- Herrle, M., Rauin, U., & Engartner, T. (2016). Videos als Ressourcen zur Generierung von Wissen über Unterrichtsrealität(en). In U. Rauin, M. Herrle & T. Engartner (Hrsg.), *Videoanalysen in der Unterrichtsforschung: methodische Vorgehensweisen und Anwendungsbeispiele*. Beltz Juventa.

- Herron, J. D. (1975). Piaget for chemists. Explaining what "good" students cannot understand. *Journal of Chemical Education*, 52(3), 146. <https://doi.org/10.1021/ed052p146>
- Heyworth, R. M. (1999). Procedural and conceptual knowledge of expert and novice students for the solving of a basic problem in chemistry. *International Journal of Science Education*, 21(2), 195–211. <https://doi.org/10.1080/095006999290787>
- Hitt, A. M. (2005). Attacking a dense problem: A learner-centered approach to teaching density. *Science Activities*. <https://doi.org/10.3200/SATS.42.1.25-29>
- Hoadley, C. M. (2004). Methodological alignment in design-based research. *Educational Psychologist*, 39(4), 203–212. https://doi.org/10.1207/s15326985ep3904_2
- Hollwedel, V., & Marohn, A. (2023). basic: Basisvorstellungen im Chemieunterricht. In H. van Vorst (Hrsg.), *Lernen, Lehren und Forschen in einer digital geprägten Welt* (S. 941–944). Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik.
- Holme, T. A., Luxford, C. J., & Brandriet, A. (2015). Defining conceptual understanding in general chemistry. *Journal of Chemical Education*, 92(9), 1477–1483. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.5b00218>
- Höner, K. (1996). Mathematisierungen im Chemieunterricht: ein Motivationshemmnis? *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 2(2), 51–70.
- Hörnig, J., & Habelitz-Tkotz, W. (2015). Chemisches Rechnen: Unbeliebt, aber unverzichtbar: Wie lassen sich Stolperfallen bei der Einführung in das chemische Rechnen vermeiden? *Praxis der Naturwissenschaften - Chemie in der Schule*, 64(2), 23–28.
- Huddle, P. A., & Pillay, A. E. (1996). An in-depth study of misconceptions in stoichiometry and chemical equilibrium at a South African university. *Journal of Research in Science Teaching*, 33(1), 65–77. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1098-2736\(199601\)33:1<65::aid-tea4>3.0.co;2-n](https://doi.org/10.1002/(sici)1098-2736(199601)33:1<65::aid-tea4>3.0.co;2-n)
- Johnson-Laird, P. N. (1983). *Mental models: Towards a cognitive science of language, inference, and consciousness*. Harvard University Press.
- Johnstone, A. H. (1991). Why is science difficult to learn? Things are seldom what they seem. *Journal of Computer Assisted Learning*, 7(2), 75–83. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2729.1991.tb00230.x>

- Johnstone, A. H. (1993). The development of chemistry teaching: A changing response to changing demand. *Journal of Chemical Education*, 70(9), 701. <https://doi.org/10.1021/ed070p701>
- Johnstone, A. H. (2000). Teaching of chemistry: Logical or psychological? *Chemistry Education Research and Practice*, 1(1), 9–15. <https://doi.org/10.1039/A9RP90001B>
- Judson, E., & Sawada, D. (2000). Examining the effects of a reformed junior high school science class on students' math achievement. *School Science and Mathematics*, 100(8), 419–425. <https://doi.org/10.1111/j.1949-8594.2000.tb17330.x>
- Jürgensmeier, F. (2020). *Offene Experimentiersituationen ermöglichen und charakterisieren: Eine Schülerlaboreinheit zu einem curricular innovativen Thema*. Logos Verlag.
- Kappenberg, F. (2013). Das verflixte Mol: Stöchiometrisches Rechnen üben - mithilfe virtueller Lernmodule. *Naturwissenschaften im Unterricht. Chemie*, 24(134), 40–42.
- Kaput, J. J., & West, M. M. (1994). Missing-value proportional reasoning problems: Factors affecting informal reasoning patterns. In G. Harel & J. Confrey (Hrsg.), *The Development of Multiplicative Reasoning in the Learning of Mathematics*. State University of New York Press.
- Kimeswenger, B., & Hohenwarter, M. (2015). Interaktion von Darstellungsformen und GeoGebraBooks für Tablets. In J. Roth, E. Süss-Stepancik & H. Wiesner (Hrsg.), *Medienvielfalt im Mathematikunterricht* (S. 171–184). Springer Fachmedien. https://doi.org/10.1007/978-3-658-06449-5_10
- Kirschner, P. A., Sweller, J., & Clark, R. E. (2006). Why Minimal Guidance During Instruction Does Not Work: An Analysis of the Failure of Constructivist, Discovery, Problem-Based, Experiential, and Inquiry-Based Teaching. *Educational Psychologist*, 41(2), 75–86. https://doi.org/10.1207/s15326985ep4102_1
- Kleine, M., Jordan, A., & Harvey, E. (2005). With a focus on 'Grundvorstellungen' Part 1: A theoretical integration into current concepts. *ZDM - International Journal on Mathematics Education*, 37(3), 226–233. <https://doi.org/10.1007/s11858-005-0013-5>

- KMK. (2004). Beschlüsse der Kultusministerkonferenz: Bildungsstandards im Fach Chemie für den Mittleren Schulabschluss (Jahrgangsstufe 10). Verfügbar 1. Juli 2025 unter https://www.kmk.org/fileadmin/veroeffentlichungen_beschluesse/2004/2004_12_16-Bildungsstandards-Chemie.pdf
- KMK. (2024). Weiterentwickelte Bildungsstandards in den Naturwissenschaften für das Fach Chemie (MSA): Beschluss der Kultusministerkonferenz vom 16.12.2004 i.d.F. vom 13.06.2024. Verfügbar 1. Juli 2025 unter https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen_beschluesse/2024/2024_06_13-WeBiS_Chemie_MSA.pdf
- Koch, H. (1995). Simplifying stoichiometry: Students react with confidence to a new approach to quantitative chemistry problems. *The Science Teacher*, 62(8), 36–39. Verfügbar 10. Juli 2025 unter <http://www.jstor.org/stable/24149522>
- Köhler, H. (1992). Fächerverbindendes Unterrichten: Drei Beispiele aus Mathematik, Naturwissenschaften und Geographie. *Lehren & lernen*, 18(6), 34–43.
- Kölbach, E., & Sumfleth, E. (2013). Analyse von Kontexteffekten beim Lernen mit Lösungsbeispielen im Fach Chemie. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 19, 159–188. <https://doi.org/10.25656/01:31703>
- Kolbeck, E. J. (2019). *Schulung von Vermittlungsfähigkeiten Promovierender im Fach Chemie: Die Weiterbildung "How to communicate chemistry?"* Logos Verlag.
- Kollosche, D. (2017). Entdeckendes Lernen: Eine Problematisierung. *Journal für Mathematik-Didaktik*, 38(2), 209–237. <https://doi.org/10.1007/s13138-017-0116-x>
- König, H. (1992). Einige für den Mathematikunterricht bedeutsame heuristische Vorgehensweisen. *Der Mathematikunterricht*, 38(3), 24–38.
- Kostić, V. Dj., Stankov Jovanović, V. P., Sekulić, T. M., & Takači, Dj. B. (2016). Visualization of problem solving related to the quantitative composition of solutions in the dynamic GeoGebra environment. *Chemistry Education Research and Practice*, 17(1), 120–138. <https://doi.org/10.1039/C5RP00156K>
- Kralisch, C. (2022). *Wissenschaftskriterien verstehen und anwenden: Weiterentwicklung der Unterrichtskonzeption choice2reflect zur Bewertung gesellschaftlicher Kontroversen*. Logos Verlag.

- Krieger, C. R. (1997). Stoichiometry: A cognitive approach to teaching stoichiometry. *Journal of Chemical Education*, 74(3), 306. <https://doi.org/10.1021/ed074p306>
- Krüger, D., Parchmann, I., & Schecker, H. (2014). *Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung*. Springer Spektrum. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-37827-0>
- Kuckartz, U. (2019). Qualitative text analysis: A systematic approach. In G. Kaiser & N. Presmeg (Hrsg.), *Compendium for Early Career Researchers in Mathematics Education* (S. 181–197). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15636-7_8
- Kuckartz, U., & Rädiker, S. (2022). *Qualitative Inhaltsanalyse: Methoden, Praxis, Computerunterstützung. Grundlagentexte Methoden* (5. Auflage). Beltz Juventa.
- Kühl, T., Scheiter, K., Gerjets, P., & Edelman, J. (2011). The influence of text modality on learning with static and dynamic visualizations. *Computers in Human Behavior*, 27(1), 29–35. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2010.05.008>
- Kuhnke, K. (2013). *Vorgehensweisen von Grundschulkindern beim Darstellungswechsel: Eine Untersuchung am Beispiel der Multiplikation im 2. Schuljahr*. Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-01509-1>
- Laakmann, H. (2013). *Darstellungen und Darstellungswechsel als Mittel zur Begriffsbildung: Eine Untersuchung in rechnerunterstützten Lernumgebungen*. Springer Fachmedien. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-01592-3>
- Landis, J. R., & Koch, G. G. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 33(1), 159. <https://doi.org/10.2307/2529310>
- Leinhardt, G., Zaslavsky, O., & Stein, M. K. (1990). Functions, graphs, and graphing: Tasks, learning, and teaching. *Review of Educational Research*, 60(1), 1–64. <https://doi.org/10.3102/00346543060001001>
- Leisen, J. (2005). Wechsel der Darstellungsformen: Ein Unterrichtsprinzip für alle Fächer. *Der fremdsprachliche Unterricht. Englisch*, 39(78), 9–11.
- Leisen, J. (2013). Darstellungs- und Symbolisierungsformen im Bilingualen Unterricht. In W. Hallet & F. G. Königs (Hrsg.), *Handbuch Bilingualer Unterricht. Content and Language Integrated Learning* (S. 152–160). Klett-Kallmeyer.

- Lengnink, K., Prediger, S., & Weber, C. (2011). Lernende abholen, wo sie stehen: Individuelle Vorstellungen aktivieren und nutzen. *PM : Praxis der Mathematik in der Schule*, 53(40), 2–7.
- Leopold, D. G., & Edgar, B. (2008). Degree of mathematics fluency and success in second-semester introductory chemistry. *Journal of Chemical Education*, 85(5), 724. <https://doi.org/10.1021/ed085p724>
- Leuders, T. (2009). Intelligent üben und Mathematik erleben. In T. Leuders, L. Hefendehl-Hebeker & H.-G. Weigand (Hrsg.), *Mathemagische Momente*. Cornelsen.
- Leuders, T. (2014). Entdeckendes Lernen – Produktives Üben. In H. Linneweber-Lammerskitten (Hrsg.), *Fachdidaktik Mathematik: Grundbildung und Kompetenzaufbau im Unterricht der Sek. I und II* (S. 236–263). Kallmeyer.
- Leuders, T. (2019). Mathematik erkunden und verstehen mit unterrichtsintegrierten Lern-Apps: Fachdidaktische Kriterien für die kognitive Aktivierung und Verstehensunterstützung. In A. Büchter, M. Glade, R. Herold-Blasius, M. Klinger, F. Schacht & P. Scherer (Hrsg.), *Vielfältige Zugänge zum Mathematikunterricht* (S. 219–231). Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-24292-3_16
- Leuders, T., Hußmann, S., Barzel, B., & Prediger, S. (2011). Das macht Sinn!: Sinnstiftung mit Kontexten und Kernideen. *Praxis der Mathematik in der Schule*, 53(37), 2–9.
- Leuders, T., & Prediger, S. (2012). Differenziert Differenzieren: Mit Heterogenität in verschiedenen Phasen des Mathematikunterrichts umgehen. In R. Lazarides & A. Ittel (Hrsg.), *Differenzierung im mathematisch-naturwissenschaftlichen Unterricht – Implikationen für Theorie und Praxis* (S. 35–66). Klinkhardt.
- Leuders, T., Prediger, S., Hußmann, S., & Barzel, B. (2012). Genetische Lernarrangements entwickeln: Vom Möglichem im Unmöglichen bei der Entwicklung der Mathewerkstatt. In *Beiträge zum Mathematikunterricht 2012* (S. 541–544). http://www.mathematik.tu-dortmund.de/ieem/bzmu2012/files/BzMU12_0056_Leuders.pdf
- Lichtfeldt, M., & Peuckert, J. (1997). Die Behandlung der Dichte im Unterricht. *Naturwissenschaften im Unterricht. Physik*, 8(41), 22–26.

- Lim, K. F. (2012). A tabular approach to titration calculations. *Teaching Science-the Journal of the Australian Science Teachers Association*, 58(3), 33.
- Lin, J.-W., Yen, M.-H., Liang, J., Chiu, M.-H., & Guo, C.-J. (2016). Examining the factors that influence students' science learning processes and their learning outcomes: 30 years of conceptual change research. *EURASIA Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 12(9). <https://doi.org/10.12973/eurasia.2016.000600a>
- Loeck, G. (1994). Vorschläge zur Didaktik der Stöchiometrie. *Chimica didactica*, 20(1), 48–67.
- Lou, A. J., & Jaeggi, S. M. (2020). Reducing the prior-knowledge achievement gap by using technology: Assisted guided learning in an undergraduate chemistry course. *Journal of Research in Science Teaching*, 57(3), 368–392. <https://doi.org/10.1002/tea.21596>
- Lowe, R. (2004). Interrogation of a dynamic visualization during learning. *Learning and Instruction*, 14(3), 257–274. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2004.06.003>
- Loyens, S. M., Jones, S. H., Mikkers, J., & Van Gog, T. (2015). Problem-based learning as a facilitator of conceptual change. *Learning and Instruction*, 38, 34–42. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2015.03.002>
- Manthey, J., & Gröger, M. (2017). ProMaC: Probleme mit Mathematisierungen im Chemieunterricht: Lehrerbefragung. In C. Maurer (Hrsg.), *Implementation fachdidaktischer Innovation im Spiegel von Forschung und Praxis* (S. 588–591).
- Marcos, D., Ngo, K., & McCurdy, D. (2024). *A-Frame* (Version 1.6.0). Verfügbar 30. November 2024 unter <https://aframe.io>
- Marohn, A. (2008). Choice2learn: Eine Konzeption zur Exploration und Veränderung von Lernervorstellungen im naturwissenschaftlichen Unterricht. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften : ZfDN*, 14, 57–83. <https://doi.org/10.25656/01:31632>
- Marohn, A. (2013). Chemische Mathematik: Mathematisierungen im Chemieunterricht verstehen lernen. *Naturwissenschaften im Unterricht. Chemie*, 24(134), 8–14.

- Marohn, A. (2021). Umgang mit Vielfalt: Das Unterrichtskonzept choice2learn. *MNU-Journal*, 1, 85–92.
- Matuschek, C. (1994). Chemische Formel "light"! Erfahrungsbericht über eine neue Art, die chemische Formel einzuführen. *Naturwissenschaften im Unterricht. Chemie*, 5 (42)(25), 15–17.
- Mayer, R. E. (2004). Should there be a three-strikes rule against pure discovery learning? The case for guided methods of instruction. *The American psychologist*, 59(1), 14–19. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:1129364>
- Mayer, R. E. (2021a). Cognitive theory of multimedia learning. In R. E. Mayer & L. Fiorella (Hrsg.), *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning* (S. 57–72). Cambridge University Press.
- Mayer, R. E. (2021b). The multimedia principle. In R. E. Mayer & L. Fiorella (Hrsg.), *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning* (S. 145–157). Cambridge University Press.
- McKenney, S. E., & Reeves, T. C. (2012). *Conducting educational design research*. Routledge.
- Menis, J. (1987). Student's ability to transfer basic mathematical concepts from mathematics to chemistry. *Studies in Educational Evaluation*, 13(1), 105–109. [https://doi.org/10.1016/s0191-491x\(87\)80024-x](https://doi.org/10.1016/s0191-491x(87)80024-x)
- Meyer, P. (2021). *Mathematisierungen im Chemieunterricht: Schwierigkeiten und mögliche Lösungsansätze* (Masterarbeit). Universität Münster.
- Meyer, P., & Marohn, A. (2024). Mathematical *Grundvorstellungen* in chemistry education: An approach to understanding chemical mathematics using the example of the concept of density. *Journal of Chemical Education*, 101(11), 4904–4915. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.4c00917>
- Ministerium für Schule und Bildung des Landes Nordrhein-Westfalen (Hrsg.). (2008). *Kernlehrplan für die Sekundarstufe I Gymnasium in Nordrhein-Westfalen: Chemie*. Verfügbar 28. Juni 2022 unter https://www.schulentwicklung.nrw.de/lehrplaene/upload/lehrplaene_download/gymnasium_g8/gym8_chemie.pdf
- Ministerium für Schule und Bildung des Landes Nordrhein-Westfalen (Hrsg.). (2011). *Kernlehrplan für die Realschule in Nordrhein-Westfalen: Chemie*. Verfügbar 28. Juni 2022 unter https://www.schulentwicklung.nrw.de/lehrplaene/lehrplan/198/g9_ch_klp_%203415_2019_06_23.pdf

- Ministerium für Schule und Bildung des Landes Nordrhein-Westfalen (Hrsg.). (2019). *Kernlehrplan für die Sekundarstufe I Gymnasium in Nordrhein-Westfalen: Chemie*. Verfügbar 28. Juni 2022 unter https://www.schulentwicklung.nrw.de/lehrplaene/lehrplan/198/g9_ch_klp_%203415_2019_06_23.pdf
- Möller, K. (2001a). Genetisches Lehren und Lernen: Facetten eines Begriffs. In D. Cech, B. Feige, J. Kahlert, G. Löffler, H. Schreier, H.-J. Schwier & U. Stoltenberg (Hrsg.), *Die Aktualität der Pädagogik Martin Wagenscheins für den Sachunterricht. Walter Köhnlein zum 65. Geburtstag*. (S. 15–30). Klinkhardt.
- Möller, K. (2001b). Konstruktivistische Sichtweisen für das Lernen in der Grundschule? In H.-G. Roßbach, K. Nölle & K. Czerwenka (Hrsg.), *Forschungen zu Lehr- und Lernkonzepten für die Grundschule* (S. 16–31). VS Verlag für Sozialwissenschaften. https://doi.org/10.1007/978-3-322-97504-1_2
- Möller, K. (2007). Kindgemäße Lernformen im naturwissenschaftlichen Lernbereich des Sachunterrichts in der Grundschule. In L. Jäkel, S. Rohrmann, M. Schallies & M. Welzel (Hrsg.), *Naturwissenschaftliches Lernen in der Grundschule: Eine neue Idee?* (S. 79–102). Mattes-Verlag.
- Möller, K. (2010). Lernen von Naturwissenschaft heißt: Konzepte verändern. In P. Labudde (Hrsg.), *Fachdidaktik Naturwissenschaft* (2. Aufl., S. 57–72). Haupt Verlag. <https://www.utb.de/doi/abs/10.36198/9783838540474-57-72>
- Möller, K., Jonen, A., Hardy, I., & Stern, E. (2002). Die Förderung von naturwissenschaftlichem Verständnis bei Grundschulkindern durch Strukturierung der Lernumgebung. In *Bildungsqualität von Schule: Schulische und außerschulische Bedingungen mathematischer, naturwissenschaftlicher und überfachlicher Kompetenzen* (S. 176–191). Beltz : Weinheim. <https://doi.org/10.25656/01:3946>
- Müller, M., & Schumann, S. (Hrsg.). (2022). *Wagenscheins Pädagogik neu reflektiert. Mit Martin Wagenschein Bildungserfahrungen verstehen und unterstützen*. Waxmann Verlag GmbH. <https://doi.org/10.31244/9783830995036>
- Nakhleh, M. B. (1993). Are our students conceptual thinkers or algorithmic problem solvers? Identifying conceptual students in general chemistry. *Journal of Chemical Education*, 70(1), 52–55. <https://doi.org/10.1021/ed070p52>

- Nakhleh, M. B., & Krajcik, J. S. (1994). Influence of levels of information as presented by different technologies on students' understanding of acid, base, and pH concepts. *Journal of Research in Science Teaching*, 31(10), 1077–1096. <https://doi.org/10.1002/tea.3660311004>
- Nakhleh, M. B., & Mitchell, R. C. (1993). Concept learning versus problem solving: There is a difference. *Journal of Chemical Education*, 70(3), 190–192. <https://doi.org/10.1021/ed070p190>
- Nakhleh, M. B., & Postek, B. (2008). Learning chemistry using multiple external representations. In J. K. Gilbert, M. Reiner & M. Nakhleh (Hrsg.), *Visualization: Theory and Practice in Science Education* (S. 209–231). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5267-5_10
- Nakoinz, S. (2015). *Untersuchung zur Verknüpfung submikroskopischer und makroskopischer Konzepte im Fach Chemie*. Logos Verlag Berlin.
- Neumann, R., Leuders, T., Prediger, S., Hußmann, S., Barzel, B., & Altieri, M. (2017). Wirksamkeit des KOSIMA-Unterrichtskonzept im Feld: Längsschnittliche Evaluation in Klasse 5 und 6. In U. Kortenkamp & A. Kuzle (Hrsg.), *Beiträge zum Mathematikunterricht* (S. 701–704). WTM.
- Niaz, M. (1989). Translation of algebraic equations and its relation to formal operational reasoning. *Journal of Research in Science Teaching*, 26(9), 785–793. <https://doi.org/10.1002/tea.3660260904>
- Nitz, S., & Fechner, S. (2018). Mentale Modelle. In D. Krüger, I. Parchmann & H. Schecker (Hrsg.), *Theorien in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung* (S. 69–86). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-56320-5_5
- NRW, Q.-L. (2020). Beispiel für einen schulinternen Lehrplan: Gymnasium – Sekundarstufe I: Chemie (Fassung vom 31.01.2020).
- Nunes, T., Desli, D., & Bell, D. (2003). The development of children's understanding of intensive quantities. *International Journal of Educational Research*, 39(7), 651–675. <https://doi.org/10.1016/j.ijer.2004.10.002>
- Nurrenbern, S. C., & Pickering, M. (1987). Concept learning versus problem solving: Is there a difference? *Journal of Chemical Education*, 64(6), 508–510. <https://doi.org/10.1021/ed064p508>

- Onwuegbuzie, A. J., & Leech, N. L. (2007). Validity and qualitative research: An oxymoron? *Quality & Quantity*, 41(2), 233–249. <https://doi.org/10.1007/s11135-006-9000-3>
- Padberg, F., & Wartha, S. (2017). *Didaktik der Bruchrechnung* (5. Aufl.). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-52969-0>
- Paik, E. S., & Schraw, G. (2013). Learning with animation and illusions of understanding. *Journal of Educational Psychology*, 105(2), 278–289. <https://doi.org/10.1037/a0030281>
- Papaphotis, G., & Tsaparlis, G. (2008). Conceptual versus algorithmic learning in high school chemistry: The case of basic quantum chemical concepts: Part 1: Statistical analysis of a quantitative study. *Chemistry Education Research and Practice*, 9(4), 323–331. <https://doi.org/10.1039/B818468M>
- Parchmann, I., & Bernholt, S. (2013). In, mit und über Chemie kommunizieren: Chancen und Herausforderungen von Kommunikationsprozessen im Chemieunterricht. In M. Becker-Mrotzek, K. Schramm, E. Thürmann & H. J. Vollmer (Hrsg.), *Sprache im Fach. Sprachlichkeit und fachliches Lernen*. (S. 241–253). Waxmann.
- Park, E.-J., & Choi, K. (2013). Analysis of student understanding of science concepts including mathematical representations: pH values and the relative differences of pH values. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 11(3), 683–706. <https://doi.org/10.1007/s10763-012-9359-7>
- Park, J. S., Park, J. H., & Kwon, O. N. (2010). Characterizing the proportional reasoning of middle school students. *The SNU Journal Of Education Research*, 19, 119–144.
- Peitz, R. (2022). *Grundvorstellungen im Chemieunterricht: Schülervorstellungen zum Dichte-Begriff* (Masterarbeit). Universität Münster.
- Pereira, D. G., Afonso, A., & Medeiros, F. M. (2015). Overview of Friedman's test and post-hoc analysis. *Communications in Statistics - Simulation and Computation*, 44, 2636–2653. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:41185544>
- Pergantis, S. A., Saridakis, I., Lyratzakis, A., Mavroudakos, L., & Montagnon, T. (2019). Buffer squares: A graphical approach for the determination of buffer pH using logarithmic concentration diagrams. *Journal of Chemical Education*, 96(5), 936–943. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.8b00588>

- Peschel, M., Neuböck-Hubinger, B., & Andersen, K. (2021). *Schwimmen oder treiben – Sinken oder untergehen: Die fachliche und semantische Bedeutung von Sprache im naturwissenschaftlich-orientierten Sachunterricht* (U. Franz, H. Giest, M. Haltenberger, A. Hartinger, J. Kantreiter & K. Michalik, Hrsg.). <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.22028/D291-36842>
- Pfangert-Becker, U. (2013). Eine Unterrichtsreihe zur experimentgestützten Erarbeitung der Molekülformel des Wassers in der Sekundarstufe I des Gymnasiums. *CHEMKON*, 20(2), 79–84. <https://doi.org/10.1002/ckon.201310197>
- Pintrich, P. R., Marx, R. W., & Boyle, R. A. (1993). Beyond cold conceptual change: The role of motivational beliefs and classroom contextual factors in the process of conceptual change. *Review of Educational Research*, 63(2), 167–199. <https://doi.org/10.3102/00346543063002167>
- Plass, J. L., Homer, B. D., & Hayward, E. O. (2009). Design factors for educationally effective animations and simulations. *Journal of Computing in Higher Education*, 21(1), 31–61. <https://doi.org/10.1007/s12528-009-9011-x>
- Plomb, T. (2013). Educational Design Research: An Introduction. In T. Plomb & N. Nieveen (Hrsg.), *Educational Design Research Part A: An Introduction* (S. 10–51). SLO.
- Plomb, T., van den Akker, J., Bannan, B., Kelly, A. E., & Nieveen, N. (2013). *Educational Design Research Part A: An Introduction* (T. Plomb & N. Nieveen, Hrsg.). SLO.
- Porst, R. (2014). *Fragebogen: Ein Arbeitsbuch*. Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-02118-4>
- Posner, G. J., Strike, K. A., Hewson, P. W., & Gertzog, W. A. (1982). Accommodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change. *Science Education*, 66(2), 211–227. <https://doi.org/10.1002/sce.3730660207>
- Potvin, P., Nenciovici, L., Malenfant-Robichaud, G., Thibault, F., Sy, O., Mahhou, M. A., Bernard, A., Allaire-Duquette, G., Blanchette Sarrasin, J., Brault Foisy, L.-M., Brouillette, N., St-Aubin, A.-A., Charland, P., Masson, S., Riopel, M., Tsai, C.-C., Bélanger, M., & Chastenay, P. (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>

- Prediger, S. (2009). Inhaltliches Denken vor Kalkül: Ein didaktisches Prinzip zur Vorbeugung und Förderung bei Rechenschwierigkeiten. In A. Fritz & S. Schmidt (Hrsg.), *Fördernder mathematikunterricht in der sekundarstufe I: Rechenschwierigkeiten erkennen und überwinden* (S. 213–234). Beltz Verlag.
- Prediger, S. (2010). "Aber wie sag ich es mathematisch?": Empirische Befunde und Konsequenzen zum Lernen von Mathematik als Mittel zur Beschreibung von Welt. In D. Höttecke (Hrsg.), *Entwicklung naturwissenschaftlichen Denkens zwischen Phänomen und Systematik. Jahrestagung der Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik in Dresden 2009* (S. 6–20). LIT-Verlag.
- Prediger, S. (2011a). Anknüpfen, Konfrontieren, Gegenüberstellen: Strategien zur Weiterarbeit mit individuellen Vorstellungen am Beispiel relativer Häufigkeiten. *PM : Praxis der Mathematik in der Schule*, 53(40), 8–13.
- Prediger, S. (2011b). Vorstellungsentwicklungsprozesse initiieren und untersuchen. *Der Mathematikunterricht*, 57(3), 5–14.
- Prediger, S. (2019). Theorizing in Design Research. *Avances de Investigación en Educación Matemática*, (15), 5–27. <https://doi.org/10.35763/aiem.v0i15.265>
- Prediger, S., Barzel, B., Hußmann, S., & Leuders, T. (2021). Towards a research base for textbooks as teacher support: The case of engaging students in active knowledge organization in the KOSIMA project. *ZDM – Mathematics Education*, 53(6), 1233–1248. <https://doi.org/10.1007/s11858-021-01245-2>
- Prediger, S., Barzel, B., Leuders, T., & Hußmann, S. (2011). Systematisieren und Sichern: Nachhaltiges Lernen durch aktives Ordnen. *Mathematik lehren*, 164, 2–9.
- Prediger, S., Hußmann, S., Leuders, T., & Barzel, B. (2014). Kernprozesse: Ein Modell zur Strukturierung von Unterrichtsdesign und Unterrichtshandeln. In I. Bausch, G. Pinkernell & O. Schmitt (Hrsg.), *Unterrichtsentwicklung und kompetenzorientierung: Festschrift für Regina Bruder* (S. 81–92). WTM Verlag.
- Prediger, S., Leuders, T., Barzel, B., & Hußmann, S. (2013). Anknüpfen, Erkunden, Ordnen, Vertiefen: Ein Modell zur Strukturierung von Design und Unterrichtshandeln. In G. Greefrath, F. Käpnick & M. Stein (Hrsg.), *Beiträge zum Mathematikunterricht 2013: Vorträge auf der 47. Tagung für Didaktik der Mathematik ; Jahrestagung der Gesellschaft für Didaktik der Mathematik vom 4.3.2013 bis 8.3.2013 in Münster* (S. 769–772). WTM Verlag. <http://www.ma>

thematik.tu-dortmund.de/~prediger/veroeff/13-BzMU_Kosima_Strukturmodell-Webversion.pdf

- Prediger, S., Link, M., Hinz, R., Hußmann, S., Thiele, J., & Ralle, B. (2012). Lehr-Lernprozesse initiieren und erforschen – fachdidaktische Entwicklungsfor-schung im Dortmunder Modell. *Der mathematische und naturwissenschaftli-che Unterricht*, 65(8), 452–457.
- Prediger, S., & Schink, A. (2009). “Three eighths of which whole?”: Dealing with changing referent wholes as a key to the part-of-part-model for the multi-plication of fractions. *Proceedings of the 33rd Conference of the International Group for the Psychology of Mathematics Education*, 4, 409–416.
- Preininger, A. M. (2017). Embedded mathematics in chemistry: A case study of stu-dents’ attitudes and mastery. *Journal of Science Education and Technology*, 26(1), 58–69. <https://doi.org/10.1007/s10956-016-9651-3>
- Probst, C., Fetzer, D., Lukas, S., & Huwer, J. (2021). Effects of using augmented reality (AR) in visualizing a dynamic particle model. *CHEMKON*. <https://doi.org/10.1002/ckon.202000046>
- Ralph, V. R., & Lewis, S. E. (2019). An explanative basis for the differential perfor-mance of students with low math aptitude in general chemistry. *Chemistry Education Research and Practice*, 20(3), 570–593. <https://doi.org/10.1039/c9rp00068b>
- Rau, M. A. (2017). Do knowledge-component models need to incorporate represen-tational competencies? *International Journal of Artificial Intelligence in Edu-cation*, 27(2), 298–319. <https://doi.org/10.1007/s40593-016-0134-8>
- Raviolo, A., Farré, A. S., & Schroh, N. T. (2021). Students’ understanding of molar concentration. *Chemistry Education Research and Practice*, 22(2), 486–497. <https://doi.org/10.1039/D0RP00344A>
- Reiners, C., & Struwe, H. (2011). Gleichungen: Didaktische Implikationen aus der Sicht des Chemie- und Mathematikunterrichts. *Praxis der Naturwissenschaften - Chemie in der Schule*, 60(3), 35–40.
- Reinfried, S. (2010). Lernen als Vorstellungsänderung: Aspekte der Vorstelungsfor-schung mit Bezügen zur Geographiedidaktik. In S. Reinfried (Hrsg.), *Schül-lervorstellungen und geographisches Lernen. Aktuelle Conceptual-Change-Forschung und Stand der theoretischen Diskussion* (S. 1–31). Logos Verlag.

- Reinmann, G. (2005). Innovation ohne Forschung? Ein Plädoyer für den Design-Based Research-Ansatz in der Lehr-Lernforschung. *Unterrichtswissenschaft*, 33(1), 52–69. <https://doi.org/10.25656/01:5787>
- Reinmann, G. (2014). Welchen Stellenwert hat die Entwicklung im Kontext von Design Research? Wie wird Entwicklung zu einem wissenschaftlichen Akt? In D. Euler & P. Sloane (Hrsg.), *Design-Based Research* (S. 63–78). Steiner.
- Reinmann, G. (2022a). Replik und Revision: Standards für Design-Based Research. *EDeR. Educational Design Research*, 6(2), 1–14. <https://doi.org/10.15460/eder.6.2.1973>
- Reinmann, G. (2022b). Was macht Design-Based Research zu Forschung? Die Debatte um Standards und die vernachlässigte Rolle des Designs. *EDeR. Educational Design Research*, 6(2). <https://doi.org/10.15460/eder.6.2.1909>
- Reinmann-Rothmeier, G., & Mandl, H. (2001). Unterrichten und Lernumgebungen gestalten. In A. Krapp & B. Weidenmann (Hrsg.), *Pädagogische Psychologie. Ein Lehrbuch* (S. 601–646). BeltzPVU.
- Rembowski, V. (2015). *Eine semiotische und philosophisch-psychologische Perspektive auf Begriffsbildung im Geometrieunterricht : Begriffsfeld, Begriffsbild und Begriffskonvention und ihre Implikationen auf Grundvorstellungen*. Universität des Saarlandes. Verfügbar 11. Juli 2024 unter <https://publikationen.sulb.uni-saarland.de/handle/20.500.11880/26717>
- Rey, G. D. (2011). Interactive elements for dynamically linked multiple representations in computer simulations. *Applied Cognitive Psychology*, 25(1), 12–19. <https://doi.org/10.1002/acp.1633>
- Riemeier, T. (2007). Moderater Konstruktivismus. In D. Krüger & H. Vogt (Hrsg.), *Theorien in der biologiedidaktischen Forschung* (S. 69–79). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-68166-3_7
- Ripsam, M., & Nerdel, C. (2022). Augmented reality for chemistry education to promote the use of chemical terminology in teacher trainings. *Frontiers in Psychology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.1037400>
- Rohrbach-Lochner, F. (2019). *Design-Based Research zur Weiterentwicklung der chemiedidaktischen Lehrerbildung zu Schülervorstellungen: Entwicklung und Evaluation eines an Forschendem Lernen orientierten Seminarkonzepts* (A. Marohn, Hrsg.; Bd. 3). Logos Verlag.

- Rolfes, T., Roth, J., & Schnotz, W. (2020). Learning the Concept of Function With Dynamic Visualizations. *Frontiers in Psychology*, 11, 693. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.00693>
- Roth, J., & Lichti, M. (2021). Funktionales Denken entwickeln und fördern. *Mathematik lehren*, (226), 2–9.
- Rothwell, W. J., Bencoter, G. M., King, M., & King, S. B. (2016). *Mastering the instructional design process: A systematic approach* (Fifth edition). John Wiley & Sons, Inc.
- Rott, B., & Gawlick, T. (2014). Explizites oder implizites Heuristentraining: Was ist besser? *mathematica didactica*, 191–212. <https://doi.org/10.18716/OJS/MD/2014.1126>
- Rott, L. (2018). *Vorstellungsentwicklungen und gemeinsames Lernen im inklusiven Sachunterricht initiieren*. Logos Verlag.
- Rott, L., & Marohn, A. (2016). Inklusiven Unterricht entwickeln und erproben: Eine Verbindung von Theorie und Praxis im Rahmen von Design-Based Research. *Zeitschrift für Inklusion*, (4). Verfügbar 17. März 2023 unter <https://www.inklusion-online.net/index.php/inklusion-online/article/view/325>
- Salim, C. A., Mikelskis-Seifert, S., & Brückmann, M. (2024). *Die Untersuchung adaptiver Lernsettings im Themenbereich "Schwimmen und Sinken" im naturwissenschaftlichen Unterricht*. Logos Verlag.
- Salle, A., & Clüver, T. (2021). Herleitung von Grundvorstellungen als normative Leitlinien: Beschreibung eines theoriebasierten Verfahrensrahmens. *Journal für Mathematik-Didaktik*, 42, 533–580. <https://doi.org/10.1007/s13138-021-00184-5>
- Salle, A., Schmidt-Thieme, B., Schulz, A., & Söbbeke, E. (2023). Darstellen und Darstellungen verwenden. In R. Bruder, A. Büchter, H. Gasteiger, B. Schmidt-Thieme & H.-G. Weigand (Hrsg.), *Handbuch der Mathematikdidaktik* (S. 429–461). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-66604-3_14
- Salta, K., & Tzougraki, C. (2011). Conceptual versus algorithmic problem-solving: Focusing on problems dealing with conservation of matter in chemistry. *Research in Science Education*, 41(4), 587–609. <https://doi.org/10.1007/s11165-010-9181-6>

- Sanger, M. J. (2005). Evaluating students' conceptual understanding of balanced equations and stoichiometric ratios using a particulate drawing. *Journal of Chemical Education*, 82(1), 131. <https://doi.org/10.1021/ed082p131>
- Sauermann, D., & Barke, H.-D. (2003). Denk' ich an das Mol - ist mir nicht ganz wohl.... *Praxis der Naturwissenschaften - Chemie in der Schule*, 52(7), 16–19.
- Schaffert, U. (2022). Schwimmen und Sinken. In *Erwerb Diagnostischer Kompetenz im Sachunterricht* (S. 93–122). Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-39063-1_4
- Schanze, S., & Parchmann, I. (2013). Mathematisierung im Chemieunterricht: Grundlagen und Umsetzung anhand von Basiskonzepten. *Naturwissenschaften im Unterricht. Chemie*, 24(134), 2–7.
- Scheiter, K., Richter, J., & Renkl, A. (2020). Multimediales Lernen: Lehren und Lernen mit Texten und Bildern. In H. Niegemann & A. Weinberger (Hrsg.), *Handbuch Bildungstechnologie* (S. 31–56). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-54368-9_4
- Schmidkunz, H. (1992). Erst qualitativ, dann quantitativ: Ein didaktisches Prinzip am Beispiel der Oberflächenspannung erläutert. *Praxis der Naturwissenschaften. Chemie*, 41(4), 3–8.
- Schmidt, H.-J. (1992). Das stöchiometrische Rechnen: Ein Plädoyer für ein unbeliebtes Thema im Chemieunterricht. *Praxis der Naturwissenschaften. Chemie*, 41(4), 8–13.
- Schmidt, H.-J., & Jignéus, C. (2003). Students' strategies in solving algorithmic stoichiometry problems. *Chem. Educ. Res. Pract.*, 4(3), 305–317. <https://doi.org/10.1039/b3rp90018e>
- Schneider, M. (2006). *Konzeptuelles und prozedurales Wissen als latente Variablen: Ihre Interaktion beim Lernen mit Dezimalbrüchen*. <https://doi.org/10.14279/DEPOSITONCE-1308>
- Schnotz, W. (2021). Integrated model of text and picture comprehension. In R. E. Mayer & L. Fiorella (Hrsg.), *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning* (S. 82–99). Cambridge University Press.
- Schoenfeld, A. H. (1979). Explicit heuristic training as a variable in problem-solving performance. *Journal for Research in Mathematics Education*, 10(3), 173–187. <https://doi.org/10.2307/748805>

- Schoenfeld, A. H. (1985). *Mathematical problem solving*. Academic press.
- Schulz, A. (2023). Situationen und Zahlen verstehen: Grundvorstellungen zur Multiplikation und Division. *Mathematik lehren*, 236, 12–15.
- Schulz, A., & Wartha, S. (2021). Multiplikation und Division. In *Zahlen und Operationen am Übergang Primar-/Sekundarstufe: Grundvorstellungen aufbauen, festigen, vernetzen* (S. 127–192). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-62096-0_5
- Scott, F. J. (2012). Is mathematics to blame? An investigation into high school students' difficulty in performing calculations in chemistry. *Chem. Educ. Res. Pract.*, 13(3), 330–336. <https://doi.org/10.1039/c2rp00001f>
- Sfard, A. (1991). On the dual nature of mathematical conceptions: Reflections on processes and objects as different sides of the same coin. *Educational Studies in Mathematics*, 22(1), 1–36. <https://doi.org/10.1007/BF00302715>
- Shadreck, M., & Ochonogor, C. E. (2017). Problem solving instruction for overcoming students' difficulties in stoichiometric problems. *Acta Didactica Napocensia*, 10(4), 69–78.
- Shavelson, R. J., Phillips, D. C., Towne, L., & Feuer, M. J. (2003). On the science of education design studies. *Educational Researcher*, 32, 25–28.
- Smith, C. (1985). *Weight, density and matter: A study of elementary children's reasoning about density with concrete materials and computer analogs*. <https://eric.ed.gov/?id=ED291595>
- Sostarecz, M. C., & Sostarecz, A. G. (2012). A conceptual approach to limiting-reagent problems. *Journal of Chemical Education*, 89(9), 1148–1151. <https://doi.org/10.1021/ed200420h>
- Spiegel, H., & Fromm, A. (1996). Eigene Wege beim Dividieren: Bericht über eine Untersuchung zu Beginn des 3. Schuljahrs. In W. Dörfler (Hrsg.), *20 Jahre Mathematikdidaktik. Trends und Perspektiven* (S. 353–360). Hölder-Pichler-Tempsky-Teubner. Verfügbar 23. Januar 2024 unter [http://math-www.uni-paderborn.de/~hartmut/Eigene_Texte/EigWegDiv\(43\).pdf](http://math-www.uni-paderborn.de/~hartmut/Eigene_Texte/EigWegDiv(43).pdf)
- Spivak, C. D. (1915). The specific gravity of the human body. *Archives of Internal Medicine*, 15(4), 628–642. <https://doi.org/10.1001/archinte.1915.00070220130011>

- Stäudel, L. (2012). Von der Modellnutzung zum Modellieren: Was der naturwissenschaftliche Unterricht vom Mathematikunterricht gelernt hat. *Naturwissenschaften im Unterricht. Chemie*, 23(132), 17–22.
- Stäudel, L., & Tepner, O. (2013). Magnesia - Kalkmörtel - Feuchte Luft: Kontexte nutzen zum chemischen Rechnen. *Naturwissenschaften im Unterricht. Chemie*, 24(134), 20–25.
- Staver, J. R., & Lumpe, A. (1995). Two investigations of students' understanding of the mole concept and its use in problem solving. *Journal of Research in Science Teaching*, 32(2), 177–193.
- Steiner, E., & Benesch, M. (2021). *Der Fragebogen: Von der Forschungsidee zur SPSS-Auswertung* (6., aktualisierte und überarbeitete Auflage). Facultas. <https://doi.org/10.36198/9783838587882>
- Streit, C., & Barzel, B. (2013). Die Mischung macht's: Verhältnisse und Brüche – ein ambivalentes Verhältnis? *Mathematik lehren*, 30(179), 9–11.
- Streller, S., Bolte, C., Dietz, D., & Noto La Diega, R. (2019). *Chemiedidaktik an Fallbeispielen*. Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-58645-7_3
- Sumfleth, E., & Kleine, E. (1999). Analogien im Chemieunterricht: Eine Fallstudie am Beispiel des "Balls der einsamen Herzen". *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften : ZfDN*, 5(3), 39–56. <https://doi.org/10.25656/01:31513>
- Sweller, J., Ayres, P., & Kalyuga, S. (2011). *Cognitive load theory*. Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8126-4>
- Taber, K. S. (2009). Learning at the symbolic level. In J. K. Gilbert & D. Treagust (Hrsg.), *Multiple Representations in Chemical Education* (S. 75–105). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8872-8_5
- Taber, K. S. (2013). Revisiting the chemistry triplet: Drawing upon the nature of chemical knowledge and the psychology of learning to inform chemistry education. *Chem. Educ. Res. Pract.*, 14(2), 156–168. <https://doi.org/10.1039/C3RP00012E>
- Talanquer, V. (2011). Macro, Submicro, and Symbolic: The many faces of the chemistry "triplet". *International Journal of Science Education*, 33(2), 179–195. <https://doi.org/10.1080/09500690903386435>

- Taskin, V., & Bernholt, S. (2014). Students' understanding of chemical formulae: A review of empirical research. *International Journal of Science Education*, 36(1), 157–185. <https://doi.org/10.1080/09500693.2012.744492>
- Tausch, M., & von Wachtendonk, M. (2011). *Chemie 2000+. Sekundarstufe I*. Buchner.
- Terhart, E. (1999). Konstruktivismus und Unterricht: Gibt es einen neuen Ansatz in der Allgemeinen Didaktik? *Zeitschrift für Pädagogik*, 45(5), 629–647. <https://doi.org/10.25656/01:5967>
- Tessmer, M. (1994). Formative evaluation alternatives. *Performance Improvement Quarterly*, 7(1), 3–18. <https://doi.org/10.1111/j.1937-8327.1994.tb00613.x>
- Thiele, R. B., & Treagust, D. F. (1991). Using analogies in secondary chemistry teaching. *Australian Science Teachers Journal*, 37(2), 10–14.
- Treagust, D., Chittleborough, G., & Mamiala, T. (2003). The role of submicroscopic and symbolic representations in chemical explanations. *International Journal of Science Education*, 25(11), 1353–1368. <https://doi.org/10.1080/0950069032000070306>
- Treptow, R. S. (2010). Carbon footprint calculations: An application of chemical principles. *Journal of Chemical Education*, 87(2), 168–171. <https://doi.org/10.1021/ed8000528>
- Tullberg, A. (2005). Lehrstrategien für das Mol: Eine phänomenographische Untersuchung. *Chimica didactica*, 31(96), 136–177.
- Uhden, O., & Gedaschko, A. (2016). Warum bildet man Verhältnisse? Eine Erarbeitung der Bedeutung von Verhältnisgrößen am Beispiel der Dichte. *Naturwissenschaften im Unterricht. Physik*, 27(153/154), 28–31.
- Umland, J. B. (1984). A recipe for teaching stoichiometry. *Journal of Chemical Education*, 61(12), 1036. <https://doi.org/10.1021/ed061p1036>
- van den Boom, M. (2022). *Die Unterrichtskonzeption feil: Fehlschlüsse identifizieren lernen*. Logos Verlag.
- Ver Beek, K., & Louters, L. (1991). Chemical language skills: Investigating the deficit. *Journal of Chemical Education*, 68(5), 389. <https://doi.org/10.1021/ed068p389>

- Vesper, J. L., Herrington, J., & Reeves, T. C. (2011). The application of expert review as a formative evaluation strategy within an educational design research study. *Proceedings of E-Learn 2011, World Conference on E-Learning in Corporate, Government, Healthcare, & Higher Education*, 973–978.
- vom Hofe, R. (1992). Grundvorstellungen mathematischer Inhalte als didaktisches Modell. *Journal für Mathematik-Didaktik*, 13, 345–364.
- vom Hofe, R. (1995). *Grundvorstellungen mathematischer Inhalte*. Spektrum Akademischer Verlag.
- vom Hofe, R. (1996a). Grundvorstellungen: Basis für inhaltliches Denken. *Mathematik lehren*, (78), 4–8.
- vom Hofe, R. (1996b). Über die Ursprünge des Grundvorstellungskonzepts in der deutschen Mathematikdidaktik. *Journal für Mathematik-Didaktik*, 17(3–4), 238–264. <https://doi.org/10.1007/BF03338832>
- vom Hofe, R. (2003). Grundbildung durch Grundvorstellungen. *Mathematik lehren*, (118), 4–8.
- vom Hofe, R., & Blum, W. (2016). “Grundvorstellungen” as a category of subject-matter didactics. *Journal für Mathematik-Didaktik*, 37, 225–254. <https://doi.org/10.1007/s13138-016-0107-3>
- vom Hofe, R., & Roth, J. (2023). Grundvorstellungen aufbauen. *Mathematik lehren*, 236, 2–7.
- Vosniadou, S., & Ioannides, C. (1998). From conceptual development to science education: A psychological point of view. *International Journal of Science Education*, 20(10), 1213–1230. <https://doi.org/10.1080/0950069980201004>
- Waddling, R. E. L. (1983). Titration calculations: A problem-solving approach. *Journal of Chemical Education*, 60(3), 230. <https://doi.org/10.1021/ed060p230>
- Wagenschein, M. (1999). *Verstehen lehren: genetisch - sokratisch - exemplarisch* (5. Aufl.). Beltz.
- Wagner, E. P. (2001). A study comparing the efficacy of a mole ratio flow chart to dimensional analysis for teaching reaction stoichiometry. *School Science and Mathematics*, 101(1), 10–22. <https://doi.org/10.1111/j.1949-8594.2001.tb18185.x>

- Wartha, S., & Forcher, C. (2021). Division: Die vernachlässigte Operation? *Grundschulmagazin*, (2), 23–30.
- Wartha, S., & Schulz, A. (2011). *Aufbau von Grundvorstellungen (nicht nur) bei besonderen Schwierigkeiten im Rechnen*. IPN Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften und Mathematik an der Universität Kiel. http://www.sinus-an-grundschulen.de/fileadmin/uploads/Material_aus_SGS/Handreichung_WarthaSchulz.pdf
- Wartha, S., & Schulz, A. (2018). *Rechenproblemen vorbeugen* (5. Auflage). Cornelsen.
- Wäß, B., Sieve, B., & Schanze, S. (2013). Stöchiometrie per Mausclick: Eine computergestützte Lernumgebung zur Erarbeitung der chemischen Formelsprache und des Molbegriffs. *Naturwissenschaften im Unterricht. Chemie*, 24(134), 15–19.
- Watters, D. J., & Watters, J. J. (2006). Student understanding of pH: “I don’t know what the log actually is, i only know where the button is on my calculator”. *Biochemistry and Molecular Biology Education*, 34(4), 278–284. <https://doi.org/10.1002/bmb.2006.494034042628>
- Weber, C. (2013). Grundvorstellungen zum Logarithmus: Bausteine für einen verständlichen Unterricht. In H. Allmendinger, K. Lengnink, A. Vohns & G. WICKEL (Hrsg.), *Mathematik verständlich unterrichten: Perspektiven für Unterricht und Lehrerbildung* (S. 79–98). Springer Fachmedien Wiesbaden. http://doi.org/10.1007/978-3-658-00992-2_6
- Weber, C. (2016). Making logarithms accessible: Operational and structural basic models for logarithms. *Journal für Mathematik-Didaktik*, 37, 69–98. <https://doi.org/10.1007/s13138-016-0104-6>
- Weigand, H.-G. (2015). Begriffsbildung. In R. Bruder, L. Hefendehl-Hebeker, B. Schmidt-Thieme & H.-G. Weigand (Hrsg.), *Handbuch der Mathematikdidaktik* (S. 255–278). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-35119-8_9
- Wessel, L. (2015). *Fach- und sprachintegrierte Förderung durch Darstellungsvernetzung und Scaffolding: Ein Entwicklungsforschungsprojekt zum Anteilbegriff*. Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-07063-2>

- Widodo, A., & Duit, R. (2004). Konstruktivistische Sichtweisen vom Lehren und Lernen und die Praxis des Physikunterrichts. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 10, 233–255.
- Widodo, A., & Duit, R. (2005). Konstruktivistische Lehr-Lern-Sequenzen und die Praxis des Physikunterrichts. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 11, 131–146.
- Wilhelm, T., & Hopf, M. (2014). Design-Forschung. *Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung*, 31–42.
- Wilzek, W. (2021). *Zum Potenzial von Anschauung in der mathematischen Hochschullehre: Eine Untersuchung am Beispiel interaktiver dynamischer Visualisierungen in der Analysis*. Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-35361-2>
- Wink, D. J., & Ryan, S. A. C. (2019). The logic of proportional reasoning and its transfer into chemistry. In M. H. Towns, K. Bain & J.-M. G. Rodriguez (Hrsg.), *It's just math: Research on Students' Understanding of Chemistry and Mathematics* (S. 157–171). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/bk-2019-1316.ch010>
- Witteck, T., Most, B., & Eilks, I. (2005). Wein und Bier, MilkyWay und Cola: Zwei Beispiele für kooperatives Lernen im Kugellager. *Naturwissenschaften im Unterricht. Chemie*, 16(88–89), 22–27.
- Wohlmuth, M. (2007). Denkfiguren im Chemieunterricht: Ein Schlüssel zur Welt der Chemie. *Praxis der Naturwissenschaften - Chemie in der Schule*, 56(4), 42–46.
- Wörler, J. F. (2018). Computersimulationen zum Lernen von Mathematik: Analyse und Klassifizierung durch Interaktionsgrade und -möglichkeiten. In G. Greefrath & H.-S. Siller (Hrsg.), *Digitale Werkzeuge, Simulationen und mathematisches Modellieren* (S. 23–48). Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-21940-6_2
- Xu, L., & Clarke, D. (2012). Student difficulties in learning density: A distributed cognition perspective. *Research in Science Education*, 42(4), 769–789. <https://doi.org/10.1007/s11165-011-9232-7>
- Yeend, R. E., Loverude, M. E., & Gonzalez, B. L. (2001). Student understanding of density: A cross-age investigation. *Physics Education Research Conference Proceedings*. <https://doi.org/10.1119/perc.2001.pr.020>

- Yuen, H. (2024). *mindAR* (Version 1.2.5). Verfügbar 17. Januar 2024 unter <https://github.com/hiukim/mind-ar-js>
- Zengin, Y. (2018). Examination of the constructed dynamic bridge between the concepts of differential and derivative with the integration of GeoGebra and the ACODESA method. *Educational Studies in Mathematics*, 99(3), 311–333. <https://doi.org/10.1007/s10649-018-9832-5>
- Zongo, I., Bougouma, M., & Moucheron, C. (2023). Proposal for a didactic tool on teaching practices related to the selective sorting of plastic waste according to relative density in high schools: Case study in Burkina Faso. *Journal of Chemical Education*, 100(3), 1118–1127. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.2c00629>
- Zumbach, J. (2010). *Lernen mit neuen Medien: instruktionspsychologische Grundlagen*. W. Kohlhammer.
- Zwetzschler, L. (2015). *Gleichwertigkeit von Termen: Entwicklung und Beforschung eines diagnosegeleiteten Lehr-Lernarrangements im Mathematikunterricht der 8. Klasse*. Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-08770-8>

Liste der eigenen Publikationen

- Meyer, P., & Marohn, A. (2023). maGic: Mathematische Grundvorstellungen im Chemieunterricht. In H. van Vorst (Hrsg.), *Lernen, Lehren und Forschen in einer digital geprägten Welt. Jahrestagung in Aachen 2022* (S. 929–932). Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik.
- Meyer, P., & Marohn, A. (2024). Mathematical *Grundvorstellungen* in chemistry education: An approach to understanding chemical mathematics using the example of the concept of density. *Journal of Chemical Education*, 101(11), 4904–4915. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.4c00917>
- Meyer, P., & Marohn, A. (2025). Mathematische Begriffe im Chemieunterricht verständnisorientiert vermitteln. In H. van Vorst (Hrsg.), *Entdecken, lehren und forschen im Schülerlabor. Jahrestagung in Bochum 2024* (S. 289–292). Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik.

Teil VII

Anhang

A Weitere Ergebnisse und Daten

A.1 Schwierigkeiten im Umgang mit den Lernmaterialien und vorgenommene Optimierungen

Tabelle A.1.1
Übersicht über die Schwierigkeiten im Umgang mit den Lernmaterialien und vorgenommenen Optimierungen

Grundvorstellung und Aufgabe	Experten- und Expertenreview	E0	Pilotierung	E1	Anpassungen
Allgemeines	Bei manchen Aufgaben suggerieren Kästchen, dass man rechnen muss. Deshalb lieber einen freien Kasten, statt Kästchen				Grundlegende optische Überarbeitung der Materialien, die unter anderem die Reduktion von Symbolen, das Verwenden größerer Kästchen statt mehrerer Linien oder Kästchen, Farbanpassungen und die Vergrößerung der Stoppschilder umfassen.
	ABs sind nicht für das Lochen geeignet				
	Viele Ausrufezeichen im Material				
	Linien in helldunkelgrau wie bei Kästchen				
	Stoppschild wird übersehen				
Website (allgemein)	Symbole reduzieren: - o Oben rechts Symbol für Phasen weg - o Diskettensymbol zu alt? - o Statt der Symbole oben rechts lieber die Seitenzahlen groß angeben				Behebung technischer Schwierigkeiten; Entfernung von AR bei interaktiven Darstellungen; Tippmenü öffnet sich nun, nachdem man einen Tipp geschlossen hat und der gerade geöffnete Tipp wird farblich hinterlegt.
	Scannen (auf jeden Fall bei dem Übungsblatt) funktioniert nicht im Querformat mit dem iPhone	SoS hat die Website über den Samsung-Browser geöffnet. Das hat nicht funktioniert.			
	Schiebereglern sind nur schwer zu bedienen, da der Button sehr klein ist	Hier und da gab es Ladeschwierigkeiten (vermutlich aufgrund des Hotspots)			
	Wiegen der Würfel etwas unhandlich, da man nicht während des Wiegens auch die Massen notieren kann	Bei manchen waren durch eine Notch die Slider etwas verdeckt			
	Tippmenü verschwindet wieder nachdem man einen Tipp geöffnet hat. Das ist umständlich				

Grundvorstellung und Aufgabe	Experten- und Expertenreview	E0	Plotierung	E1	Anpassungen
Würfelvorstellung: Aufgabe 1a (Experiment)	eine Waage, ein Messer, ein Latritzbonbon ergänzen. Bei Fotos auch die Speckmaus, das ...	Komma auf Waage wurde nicht verstanden		S5 legt Süßigkeit während des Trierens auf die Waage und wundert sich, dass die Waage 0 g anzeigt.	Artikel, Anzahl und Originalfotos der Süßigkeiten wurden hinzugefügt; Schere statt Messer zum Material hinzugefügt; Auftrag zum Beschreiben des Vorgehens entfernt; Lineal wurde nicht ergänzt, da dies zu einem höheren Zeitaufwand führt und die Lernenden teilweise von alleine ein Lineal verwenden
	Fotos von originalen Süßigkeiten nehmen	SuS nutzen teilweise zusätzlich ein Geodreieck		Probleme mit Trierfunktion der Waage. (Süßigkeit während des Trierens auf die Waage gelegt)	
	"Finde" nicht Fett markieren	Teilweise versuchen die SuS sehr präzise zu arbeiten und benötigen dadurch länger (weniger Zeit für Aufgabe b)			
	Numerierung E2 für AB unklar				
	Bei dem Experiment lieber Schere statt Messer!				
	Bei dem Experiment geht es nur um den Problemaufriss, deshalb soll die Verbalisierung gestrichen werden. Nur die gemessenen Werte sollen notiert werden.				
	Statt experimentelle Alternative, sollen alle drei Aufgaben auf ein Blatt.				
	Lineal wird bei Experiment benötigt				
	Aufgabenstellung fehlt ein Punkt am Ende				

Grundvorstellung und Aufgabe	Experten- und Expertenreview	E0	Pilotierung	E1	Anpassungen
Würfelvorstellung: Aufgabe 1a (digital)	a) und b) statt Antwort: lieber Begründung: schreiben Lieber zwei verschiedene Varianten um den Schwersten Stoff und den schwersten Würfel zu kennzeichnen, damit das nicht durch- einander geht Würfel aus dem gleichen Stoff sollen nebeneinander sein Unnatürliche Reflexionspunkte bei den Würfeln Platz zum Rechnen? Würfel in AR sehen anders aus als auf dem Blatt Evtl. Abkürzungen m und V für SuS unklar Trennung von a) in drei Teilaufgaben		Symbol m unklar S2 hat Probleme mit dem Scannen, da er vergessen hat, das richtige AB auszuwählen S4 benötigt Platz für Notizen, da er nicht sofort die Masse in die vorgesehenen Felder einträgt. V und m scheinen unklar zu sein.		Statt einer beliebigen Anordnung wurden zur Übersichtlichkeit die Würfel des gleichen Stoffes untereinander platziert; Änderung von Antwort für "Begründung"; Sequenzierung der Aufgabe in mehrere Teilaufgaben; Ergänzung von Linien bei den fehlenden Massen, um zu verdeutlichen, dass dort etwas eingetragen werden soll; Anpassung des Umgebungslichts der a-scene zur besseren Sichtbarkeit der Würfelfarben; Hinweise zu Masse und Volumen wurden ergänzt

Grundvorstellung und Aufgabe	Experten- und Expertenreview	E0	Plotierung	E1	Anpassungen
Würfelvorstellung: Aufgabe 1b	Aufgabenstellung das Wort „Stoff“ hervorheben	Symbol V für Volumen ist unklar		Schreibt Begründung in den Notizenkasten, statt auf die vorgesehene Linien.	Hinweis Anzahl der Kubikzentimeterwürfel = Volumen wurde hinzugefügt
	Evtl. suchen die SuS auch kgV	Cm ³ unklar			
	Man kommt nicht auf die Einheit der Dichte, obwohl man ja die Masse von einem Kubikzentimeter-Würfel berechnet	Manche rechnen V/m statt m/V bei 1b, Nachfrage nach Taschenrechner			
	Verwandtschaft von b) und Aufgabe a)(Experiment) ist nicht so deutlich (bzgl. des Hinweises)				
	Für die Phase des Erkundens sehr voll und viele Möglichkeiten des Scheiterns				
	Bei Aufgabe b) schon Kubikzentimeter-Würfel einführen (z. B. als Legende) und ggf. erläutern, dass Volumen = Anzahl an Kubikzentimeter-Würfeln ist				
Würfelvorstellung: Aufgabe 2 (Reflexionsaufgabe)	Antwort wird bei Aufgabe 3 schon vorgegeben		S3 hat das Gefühl etwas falsch gemacht zu haben, da er bei der Aufgabe nichts aufschreiben konnte/musste		Aufgabe und Darstellung wurde an Aufgabe 1b angepasst, um den Zusammenhang zwischen Volumen und Anzahl an Würfeln zu verdeutlichen; Für den Einsatz der Aufgabe im Rahmen der Selbsterarbeitung: Forderung nach einer schriftlichen Begründung wurde zunächst entfernt, aber auf Basis der Plotierung in gekürzter Form wieder ergänzt
	Evd. nur mündlich		S2 hat Schwierigkeiten die Würfel zu zählen		

Grundvorstellung und Aufgabe	Expertinnen- und Expertenreview	E0	Pilotierung	E1	Anpassungen
Würfelvorstellung: Aufgabe 3a					
	Schwarze Ränder bei Video	Rho wird als ρ gelesen	S3 scannt die Aufgabe anstatt das Video unter Tipps zu suchen		Symbol für ρ wurde angepasst, wodurch es zwar schwieriger zu schreiben ist, jedoch mit der Darstellung in Schulbüchern übereinstimmt und nicht mit "p" verwechselt wird; Quadrate im Video wurden durch Würfel ersetzt; Anpassung der Formulierungen (u.a. "wir beobachten" statt "wir denken"); Symbol für Video hervorgehoben; Anpassung der Übersetzungsaufgabe auf dem Merkzettel, sodass dort der Würfel aus einem Swimmingpool statt einem Würfel ausgeschnitten wird und die Übersetzungsreihenfolge umgedreht wird
	Im Video sind Quadrate abgebildet und auf dem AB Würfel!	Einige SuS füllen die Lücken bei der ersten Grundvorstellung nicht aus	S2 versucht Video durch Scannen statt über die Website zu öffnen		
	Da kann man einfach aus dem Video abschreiben				
	Ist Gummi innen weiß?!				
	Statt „Wir denken“ lieber etwas wie: „wir sagen“ vs „in der Chemie sagen wir“. Auch lieber ein Kubik- (Würfel) wiegt statt „hat eine Masse von“				
	Video deutlicher hervorheben, z. B. durch Symbol				
	Nicht alles aus einem Würfel ausschneiden (evtl. Verwechslung mit Kubikzentimeter-Würfel), sondern andere Formen nutzen. Bei Wasser z. B. Badewanne				
	„Wir schreiben“ lieber nach oben, damit man die Reihenfolge erkennt				
Würfelvorstellung: Aufgabe 3b					
				S7: "Hä, da muss ich ja nix machen"	Ergänzung der Aufgabe durch einen schriftlichen Teil
				S2: Ich weiß nicht genau, was wir jetzt schreiben sollen"	
				S5: Ist das auch eine Aufgabe?"	
				S5: "Das ist falsch, weil es wiegt nicht so viel und hat deshalb auch nicht so eine hohe Dichte."	
				S7 übersieht die Aufgabe und S8 weist darauf hin	

Grundvorstellung und Aufgabe	Experten- und Expertenreview	E0	Pilotierung	E1	Anpassungen
Würfelvorstellung: Aufgabe 4	18:2 auch lieber als Bruch schreiben				
Würfelvorstellung: Aufgabe 5a	Explizierter machen mit der Form - Dichte von zwei Stoffen mit unterschiedlicher Form berechnen lassen. Was fällt auf? Die letzten drei Beispiele sind sehr schwierig (im Kopf)		"RhoSSchreiben ist schwierig S3 kann drittes Beispiel nicht im Kopf lösen und wundert sich über Ergebnis im Taschenrechner. Er fragt sich, ob man immer Masse/Volumen rechnen muss.		Anpassung der Aufgaben, sodass diese im Kopf gelöst werden können
Würfelvorstellung: Aufgabe 5b	Ist nicht intuitiv, da man die Sachen immer auf die Waage etc. ziehen möchte Spültab auf AB schlecht sichtbar Bei AR Bild, Trennlinie zwischen Objekte und Messgeräte Rechnung inkl. Umrechnung schwierig bei USB-Stick		S4 verwirrt durch Neuladen beim Drehen S2 möchte die Objekte wieder zurück auf ihren ursprünglichen Platz bringen (das geht nur, wenn man auf ein anderes Objekt tippt) Gleichzeitiges Scannen und Tippen wirkt unhandlich. S2 merkt dies explizit an. Mehrmaliges Tippen auf Schlüssel notwendig, da die Lernenden scheinbar Schwierigkeiten haben, das Tablet zu halten und gleichzeitig zu tippen. S3 wie kommt man auf das Volumen von dem USB-Stick? S1 bekommt Schlüssel nicht aus dem Messzylinder S4 fragt sich, warum man den Spültab nicht ins Wasser geben darf		technische und optische Optimierungen (Neuladen beim Drehen, Sichtbarkeit des Spültabs, Trennlinie zwischen Objekt und Messgerät); Entfernung von AR; Ergänzung einer Erklärung bei der Kombination des Spültabs mit Wasser; Angabe der Maße in cm statt mm, um Umrechnung zu vermeiden

Grundvorstellung und Aufgabe	Experten- und Expertenreview	E0	Pilotierung	E1	Anpassungen
Würfelvorstellung: Aufgabe 5b			S3 fragt sich, warum man den Spülmaschinentab nicht ins Wasser geben darf. S2 hat Schwierigkeiten beim Umrechnen (überliest den Hinweis) und spricht die Einheiten falsch aus S3 ist Unterschied zwischen Objekt/Messgerät unklar. Er behandelt alles gleich. S3 erkennt zunächst nicht die Funktion des Lineals und denkt, man müsste davon auch die Dichte berechnen S4 ist Unterschied zwischen Objekt und Messgerät unklar (versucht das Lineal zu wiegen) S1 weiß anfangs nicht genau, was er machen soll S4 hat Probleme mit der Berechnung des Volumens + kein Bewusstsein darüber, dass es die Tipps gibt und die dabei eventuell helfen könnten Schwierigkeiten bei der Volumenbestimmung, da sie Volumenberechnung noch nicht hatten. Hinweis von Studi auf die Tipps hilft weiter. SuS haben also Tipps vergessen.		technische und optische Optimierungen (Neuladen beim Drehen, Sichtbarkeit des Spültabs, Trennlinie zwischen Objekt und Messgerät); Entfernung von AR; Ergänzung einer Erklärung bei der Kombination des Spültabs mit Wasser; Angabe der Maße in cm statt mm, um Umrechnung zu vermeiden

Grundvorstellung und Aufgabe	Experten- und Expertenreview	E0	Plotierung	E1	Anpassungen
Würfelvorstellung: Aufgabe 6a	Farbfehler beim Druck des Beispiels Wenn man nicht weiß, wie man das Volumen eines Quaders berechnet, braucht man die Hilfe Hinweis auf $1 \text{ mL} = 1 \text{ cm}^3$ wäre gut (Umrechnungschwierig) Platte ist zu groß und dadurch nicht so gut zu erkennen Beispiel ist fachlich nicht korrekt, da fein verteiltes Metall immer schwarz ist		Platte ist schwierig zu erkennen - S2 zeichnet sie ab S1 hat Schwierigkeiten beim Umrechnen von Kubikmilli- zu Kubikzentimeter		Sichtbarkeit der Platte erhöht; Notwendigkeit zur Umrechnung durch Angabe der Maße in cm entfernt; zur fachlichen Korrektheit: Bei sehr starker Verkleinerung eines Metalls - etwa als Pulver - können sich neben der Farbe auch bestimmte Materialkonstanten (z. B. Dichte, elektrischer Widerstand) verändern. Im Rahmen der didaktischen Reduktion für die 7. Jahrgangsstufe wird dieser Spezialfall hier nicht berücksichtigt. Allerdings wurde die fachliche Ungenauigkeit angepasst, dass Stoffeigenschaften immer statt nur "häufiginabhängig vom Volumen sind."
Würfelvorstellung: Aufgabe 6b	Hier wird durch das Bild ganz stark auf die CV gedrängt ausgeschnittene Würfel wirken unterschiedlich groß				Drängung zur Würfelvorstellung ist in diesem Fall auch gewünscht
Würfelvorstellung: Aufgabe 7a	Ordne die Würfel vs. vermutete Reihenfolge - Bei beidem den gleichen Operator verwenden Farbe ändert sich in AR Merksatz kritisch. Das vor dem Doppelpunkt sollte mit in dem Satz aufgenommen werden, damit SuS das nicht unzulässig kürzen!				wurde komplett überarbeitet (siehe aktuelle Materialien); Lösungen auf der Website wurden stärker hervorgehoben

Grundvorstellung und Aufgabe	Experten- und Expertenreview	E0	Pilotierung	E1	Anpassungen
Würfelvorstellung: Aufgabe 7b	Punkte nicht intuitiv - wenn Punkte, dann nicht übereinander anordnen Aufgabenstellung undeutlich. Erst rechnen und dann verbinden!		S3 verwechselt Masse mit Volumen S3 hat Schwierigkeiten die Aufgabe zu verstehen S1 findet sich bei den Tipps nicht zurecht und gelangt nicht zur Lösung der Aufgabe S2 findet Lösungen nicht unter Tipps		
Würfelvorstellung: Aufgabe 7c	Sehr gute Aufgabe! Sollte vielleicht am Anfang stehen für manchen Lernetyp In AR sollte deutlich werden, dass die Waage rechts den Einheitswürfel zeigt		S1 fragt, ob man eine Begründung schreiben soll, wenn man denkt, dass es richtig ist, weil daneben ja noch Platz ist		

Grundvorstellung und Aufgabe	Experten- und Expertenreview	E0	Plotierung	E1	Anpassungen
Würfelvorstellung: Merktzettel	Wort „Merktzettel“ sollte auffälliger sein		S3 vergisst den Merktzettel mit den Lösungen zu kontrollieren und hat Schwierigkeiten die Lösung auf der Website zu finden	Denkt, dass Kubikzentimeter die Einheit der Masse ist.	Vergrößerung der Überschrift „Merktzettel“; Kürzung der Lückentexte; Entfernung von Symbol und Seitenzahlen; Grundvorstellung wird fertig vorgegeben, um Lesbarkeit und Kongruenz zu erhöhen; Aufgaben auf den Merktzetteln wurden so angepasst, dass sie sich leicht von den Aufgaben auf den ABs unterscheiden; Statt SSichernsteht auf der Website nun „Lösungen zum Merktzettel“
	Als Symbol lieber Gehirn				
	Unten rechts zu viele Pfeile				
	Warum muss man alles nochmal machen?				
	Zu viel Lückentext				
	Seitenzahlen bei Merktzetteln verwirrend				
	Beim Sichern nicht exakt die gleiche Aufgabe zum Notieren der GV, lieber die GV komplett ab-schreiben lassen oder schon fertig vorgeben				
	Schritt von Kubikzentimeter-Würfel zu Volumen schwierig (fällt hier zum ersten Mal)				

Grundvorstellung und Aufgabe	Experten- und Expertenreview	E0	Pilotierung	E1	Anpassungen
Auftriebsvorstellung: 1a+b (Experiment)	Design und Übersichtlichkeit - zu viele Linien Vielleicht zuerst das Wiegen erwähnen, sonst werden die Riegel zuerst ins Wasser geworfen	1 SoS wollte erst das Experiment machen und dann vermuten Nachfrage, ob Wasser abgemessen werden muss SSagt man niedrigere oder kleinere Dichte?“ Mehreren Gruppen war unklar, welches Stück von dem Bounty gewogen und ins Wasser gegeben werden sollte Soll man die Vermutung korrigieren, wenn man falsch lag? Wenn ja, wo? Manche waren sich im Laufe des Experiments unsicher, was Bounty und was Milky Way war Einige streichen bei der Vermutung ii) schwimmen/nicht schwimmen nichts durch, umkreisen oder unterstreichen es Unsicherheit beim Aufräumen	Kristallisierschale ist unbekannt S2 führt erst Experiment durch und stellt dann eine Vermutung auf. Erkennt dann aber, dass das falsch war: S2 hat Reihenfolge der ABs vertauscht S5 wiegt Riegel mit Verpackung und gibt das Gewicht in kg an. S7 schreibt die Beobachtung des Wiegens auf, statt die Beobachtung, wenn man den Riegel ins Wasser gibt. S2 fragt sich, ob man die Riegel mit der Schere zerschneiden soll. S2 führt Experiment vor der Vermutung durch Schwierigkeiten mit der Formulierung "Das kleinere Stück der beiden". Denkt, dass beide Riegel kleiner geschnitten werden müssen Beachtet Experimentieranleitung nicht. S7 schneidet von beiden Riegeln ein kleines Stück ab, statt nur von dem Bounty.	Optische Anpassungen zur besseren Übersichtlichkeit und Struktur (u.a. Ergänzung von Pfeilen, Reduktion von Linien); Umformulierung von Arbeitsschritten; Sequenzierung der Aufgaben in mehrere Teilaufgaben	

Grundvorstellung und Aufgabe	Experten- und Expertenreview	E0	Plotierung	E1	Anpassungen
Auftriebsvorstellung: Aufgabe 3		Teilweise wurde bei der Simulation mit der Masse argumentiert oder die Dichte mit der Masse verwechselt Schwierigkeiten bei der Simulation: „Ich verstehe das nicht“		Fragt sich, ob man jetzt nicht den Merksatz ausfüllen soll. Versteht nicht, was bei der Simulation gemacht werden soll. Füllt anschließend die Vokale aus. S7 hat Probleme die Simulation zu öffnen. „Das müsste doch 2 g statt 1 g sein.“(Fehler in Simulation und AB?) Ich weiß wann es ist, aber ich weiß nicht wie ich das aufschreiben soll.“ Füllt die Lücken (falsch) aus, obwohl nicht die Simulation bearbeitet wurde. S5 denkt, dass die Form entscheidend für den Auftrieb ist. S2 erkennt Simulation nicht als Aufgabe S7 fragt sich, ob man in das Bild der Simulation etwas schreiben soll. S8 ist von den vielen Variablen überfordert und füllt daraufhin nur den Lückentext aus. S4 denkt, dass es am Salzwasser liegt, ob etwas aufsteigt, schwebt oder sinkt Denkt, dass Aggregatzustände für den Auftrieb entscheidend sind.	Umfangreiche Anpassungen der Aufgabe, die im Haupttext erläutert sind

Grundvorstellung und Aufgabe	Experten- und Expertenreview	E0	Plotierung	E1	Anpassungen
Auftriebsvorstellung: Aufgabe 3					
S8 verwirrt durch Änderung nach gasförmig					
S2 verändert Schieberegler und sagt: Ich check das nicht!"					
Versteht die Aufgabe nicht					
S7 verwechselt Masse mit Dichte					
S2 versucht die Werte auf dem Bild in der Simulation einzustellen. Nachdem sich dadurch nichts ändert, äußert S2: Ich verstehe das nicht"					
S7 hat Schwierigkeiten mit der Simulation					
S2 versteht Simulation nicht und möchte den Würfel verschieben.					
S7 hat Probleme, die Simulation zu öffnen. Als sie geöffnet wurde, versteht S7 die Simulation nicht.					
Jahrmarktbild	Siehe Abbildung A.1.1	Schrift "Jahrmarkt" wurde geändert, damit „h" nicht wie „b" aussieht; Helligkeit und Struktur des Weges angepasst; Untergehen der Enten stärker hervorgehoben; Schattierungen ergänzt; Sprechblase der Verkäuferin ist nun höher; Hervorhebung der AR-Brille			

Abbildung A.1.1

Feedback der Expertinnen und Experten zum Jahrmarktbild



A.2 Antwortmuster zur Aufgabe 3 der Auftriebsvorstellung

Tabelle A.2.1

Antwortmuster zur Aufgabe 3 der Auftriebsvorstellung (E3)

3a	3b (i) L ₁	3b (i) L ₂	3b (i) L ₃	3b (ii) L ₁	3b (ii) L ₂	3b (ii) L ₃	3b (iii) L ₁	3b (iii) L ₂	3b (iii) L ₃	ID
Form	Dichte (1)	dichter	Masse	Dichte (1)	dichter	-	-	-	-	S23
Dichte & Masse	Form	-	-	Form	-	-	Form	-	-	S15
										S16
										S21
										S17
										S22
Dichte & Form	Dichte (1)	dichter	Masse	-	-	-	-	-	-	S1
										S2
Dichte (1)	Dichte (1)	Dichte	Dichte (1)	Dichte (1)	Dichte	Dichte (1)	Dichte (1)	Dichte	Dichte (1)	S14
		dichter	Masse	Dichte (1)	-	-	-	-	-	S26
					dichter	-	-	-	-	S25
		kleiner/ geringer (1)	Dichte (1)	Dichte (1)	höher	Dichte (1)	Dichte (1)	größer/ höher (1)	Dichte (1)	S12
-	Dichte (1)	kleiner/ geringer (1)	Dichte (1)	Dichte (1)	gleich (1)	Dichte (1)	Dichte (1)	niedriger	Dichte (1)	S19

Anmerkung. L₁ = Eigenschaft des blauen Stoffes/Gegenstandes; L₂ = Tendenz (größer/kleiner/gleich); L₃ = Eigenschaft des grauen Stoffes. Beispiel 3b(i): „Ist die [L₁] des blauen Stoffes/Gegenstandes [L₂] als die [L₃] des grauen Stoffes, steigt der blaue Stoff/Gegenstand auf.“

Tabelle A.2.2

Antwortmuster zur Aufgabe 3 der Auftriebsvorstellung (E2)

3a	3b_(i) L ₁	3b_(i) L ₂	3b_(i) L ₃	3b_(ii) L ₁	3b_(ii) L ₂	3b_(ii) L ₃	3b_(iii) L ₁	3b_(iii) L ₂	3b_(iii) L ₃	ID
Dichte (1)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	S12
										S3
	Dichte (1)	kleiner / geringer (1)	Dichte (1)	Dichte (1)	gleich (1)	Dichte (1)	Dichte (1)	schwerer (0.5)	Dichte (1)	S20
								wiegt	Dichte (1)	S4
			Größe	Dichte (1)	kleiner	Dichte (1)	Dichte (1)	größer / höher (1)	Dichte (1)	S21
		leichter (0.5)	Dichte (1)	Dichte (1)	-	Dichte (1)	Dichte (1)	schwerer (0.5)	Dichte (1)	S16
					gleich (1)	Dichte (1)	Dichte (1)	-	Dichte (1)	S8
								größer / höher (1)	Dichte (1)	S6
								schwerer (0.5)	Dichte (1)	S18
										S2
										S24
Dichte Form	Dichte (1)	dichter	Dichte (1)	Masse	-	-	-	-	-	S10
										S13

Anmerkung. L₁ = Eigenschaft des blauen Stoffes/Gegenstandes; L₂ = Tendenz (größer/kleiner/gleich); L₃ = Eigenschaft des grauen Stoffes. Beispiel 3b(i): „Ist die [L₁] des blauen Stoffes/Gegenstandes [L₂] als die [L₃] des grauen Stoffes, steigt der blaue Stoff/Gegenstand auf.“

Abbildung A.3.1

Fragen zu den Situationen auf dem Jahrmarktbild (E2)



A.3 Fragen zum Jahrmarktbild (E2)

A.4 Transkripte der Plenumsphasen

A.4.1 E3

Reflexionsaufgabe der Würfelvorstellung

44:53 – Start: Erschließen -> Reflexionsaufgabe

L: Gut, dann wollen wir einmal sammeln, was ihr diskutiert habt. Also, vielleicht beschreibt erst einmal, wo jetzt hier genau dieses Problem liegt, bei diesem Beispiel. Ja!

S3: Also bei Chloe ist das Problem, dass sie denkt, dass sozusagen alles gleich viel Masse ist. Also dass das alles gleich viel Material ist. Aber wenn das gleich viel Material wäre, dann wäre sogar Gold schwerer.

L: Mhm, weitere Ideen? Ja?

S7: Also eigentlich ist das von Malia, weil man kann nur sagen, welcher Stoff verhältnismäßig schwerer ist, also wenn die das gleiche Volumen haben, weil wenn viel mehr Volumen an Eisen da ist und viel weniger an Gold, dann ist Eisen natürlich schwerer als Gold, aber wenn es das gleiche Volumen hat, dann ist Gold schwerer.

L: Mhm, weitere Ideen? Okay, welcher Stoff ist jetzt also verhältnismäßig am schwersten? Wie kann man darauf kommen? Ja!

S4: Gold?

L: Gold, okay? Und wie kann man darauf kommen?

S4: Weil ein Würfel Gold wiegt 20 Gramm und ein Würfel Eisen wiegt 8 Gramm.

L: Und wie bist du darauf gekommen? Was hast du da gerechnet?

S4: Da kann man einfach die Würfel zählen. Und dann durch das Gewicht und genauso beim Gold. Und dann würde halt bei dem Würfel ein 8 rauskommen und beim Gold 20.

L: Okay, also können wir jetzt sagen: Gold ist schwerer als Eisen?

S20: Verhältnismäßig ist Gold schwerer als Eisen. Man sieht ja auf dem linken Bild zum Beispiel auch, da ist das Eisen ja schwerer, weil da auch deutlich mehr Eisen ist. Das bedeutet nur, dass, wie S7 schon gesagt hat, ein Würfel Gold schwerer ist als ein Würfel Eisen. Aber wenn es zum Beispiel ein Würfel Gold wäre und fünf Würfel Eisen, dann wäre Eisen ja wieder schwerer.

L: Ja, sehr schön erklärt auch. Ganz genau. Das heißt, wie können immer nur sagen, welcher Stoff verhältnismäßig am schwersten ist. Da denkt man häufig nicht dran an dieses „verhältnismäßig“, dass man immer das gleiche Volumen betrachten muss. Und das Tolle ist, dass wir in der Chemie und in anderen Naturwissenschaften extra eine Stoffeigenschaft dafür haben, die dieses verhältnismäßig schwerere immer berücksichtigt. Und das ist...?

S4: Die Dichte?

L: Die Dichte. Ganz genau.

48:07 – Ende: Erschließen -> Reflexionsaufgabe

Reflexionsaufgabe der Auftriebsvorstellung

2:02:33 Start: Erschließen -> Reflexionsaufgabe

L: Alles klar, dann bitte einmal sammeln. Also, warum liegen Chloe und Jerome falsch? Wie können wir das mit dem Schokoriegel-Experiment erklären? Fangen wir vielleicht erstmal mit Chloe an. „Das Volumen ist entscheidend.“ Warum ist das Volumen nicht entscheidend ob etwas schwimmt oder sinkt? Bitte.

S26: Chloe sagt ja, dass (L: Lauter) große Gegenstände sinken und wir haben es ja gemacht, dass – wir haben Bounty ja durchgeschnitten zu einem kleinen Stück und das ist ja trotzdem gesunken, also kann das auf jeden Fall nicht stimmen.

L: Sehr gut. Dann: „Die Masse ist entscheidend.“ Warum ist die Masse nicht entscheidend, ob etwas schwimmt oder sinkt? Wie könnt ihr das mit dem Schokoriegel-Experiment erklären?

S10: Also wir haben ja den (L: Lauter) Bounty kleiner geschnitten als das Milky Way, aber der Bounty ist trotzdem auf den Boden gesunken.

L: Was meinen die anderen dazu? Widerlegt diese Aussage, das von Jerome, dass die Masse entscheidend ist? Kannst du das noch mal wiederholen und noch mal lauter bitte?

S: Also wir haben den Bounty ja kleiner geschnitten und er ist aber trotzdem auf den Boden des Glases gesunken und der Milky Way war immer noch am Schwimmen.

L: Okay? Ich glaube, Jerome wäre damit jetzt nicht zufrieden. Der würde sagen, ja und? Die Masse ist ja auch entscheidend.

S12: Nein, ist sie nicht, weil wenn man den Bounty, haben wir ja durchgeschnitten, der ist trotzdem noch auf dem Boden geblieben und der war ja auch leichter als der Milky Way, aber es ist trotzdem auf dem Boden geblieben. Somit würde ich Jeromes Aussage nicht als richtig bestimmen oder bewerten.

L: Ganz genau. Die Information hat nämlich gerade noch gefehlt. Ihr habt ihn zwar kleiner geschnitten, aber der muss auch leichter sein. Das hat gefehlt. Sehr schön.

2:04:52 Ende: Erschließen -> Reflexionsaufgabe

Jahrmarktbild-Besprechung der Würfelvorstellung

1:07:58 Start: Sichern -> Jahrmarktbild Besprechung

L: Dann schauen wir uns noch einmal, das war ja das Ziel, das Jahrmarktbild, an. Mit diesen Fragen zu dieser Stärke-Situation, dem Stärkewettbewerb. Ihr habt ja jetzt die Dichte, eh die Würfelvorstellung der Dichte kennengelernt. Ich schreib das hier mal oben drüber. Und wir versuchen jetzt mal mit Hilfe dieser Würfelvorstellung die Fragen, die ihr gestellt habt, zu beantworten. Vielleicht starten wir erstmal damit mit "Was stimmt nicht?", "Warum stimmt da was nicht?". Wer kann noch an dieser Situation beschreiben, was komisch ist, was da nicht stimmt? Ja bitte.

S6: Das waren so ein paar Dinge zum Beispiel mit Luftballons, dass die irgendwie so anders sind zum Beispiel, als bei denen zu Hause haben manche gesagt oder so. Und dass das komisch ist, dass das Kind einen Stein, einen größeren Stein besser tragen kann.

L: Einen größeren Stein besser tragen kann? Ja. Was ist da noch seltsam? Ja?

S7: Also das Kind trägt so einen riesigen Stein ganz leicht und der erwachsene Mann trägt einen kleineren. Und der, ich glaube, das ist ein Bodybuilder, auf jeden Fall hat der sehr viele Muskeln, und der kann nur so ein kleines und hat dabei schon Probleme.

L: Ganz genau, das habt ihr ja auch gefragt, warum kann sie so einen schweren Stein tragen? Und warum kann der so schwere Steine tragen? Ja, woran könnte das jetzt liegen? Wie könnt ihr das erklären? Wie kann es sein, dass der Mann sich da mit dieser kleinen Kugel so abmüht und das Kind nur noch diesen riesigen Stein tragen kann? Habt ihr eine Idee? Bitte!

S3: Die Dichte des Steins des Kindes ist geringer als die Dichte des Steins des Erwachsenen.

L: Sehr gut. Jetzt versuchen wir das Ganze nochmal – ihr habt ja die Würfelvorstellung...

Moment, ich muss mich eben einmal neu einloggen, sonst kann ich leider nicht zeichnen. SO, das ist vollkommen richtig, was du gerade gesagt hast, ich möchte aber gerne nochmal auf die Würfelvorstellung zurückkommen. Also wenn wir uns jetzt hier mal vorstellen und hier mal so Würfel einzeichnen bei diesen Gegenständen, dann kann ich da hier bei dieser kleinen grünen Kugel nicht so viele, also wenn ich mir jetzt vorstelle, dass die aus so kleinen Würfeln, aus kleinen Kubikzentimeterwürfeln zusammengesetzt ist, kann ich mir hier nur so zwei Würfel reinzeichnen. Hier bei den Steinen, ja, eins, zwei, drei, vier, fünf, sechs. Und hier bei diesem großen Objekt, ja, da passen nochmal deutlich mehr rein, da sind wir hier bei sechs, sieben, ungefähr acht können wir da so reinzeichnen. Wie können wir das jetzt nochmal erklären? Mit Hilfe der Würfelvorstellung der Dichte, warum der Mann jetzt diese kleine Kugel so leicht tragen kann, äh so schwer tragen kann, und das Kind diesen riesen Stein so leicht. Was hat es da mit den Würfeln auf sich?

S7: Weil die Steine und die Kugel aus unterschiedlichen Stoffen bestehen und die Dichte von dem Stoff des Mannes ist, also der Stoff davon, ist dichter als der von dem Kind?

L: Und was hat das dann mit den – also was kannst du dann über die Würfel aussagen?

S7: Also da – pro Würfel ist das schwerer.

L: Also wenn wir jetzt mal einen so einen Würfel hier rausnehmen würden und einen so einen Würfel mal hier raus, was ist da schwerer, was ist da leichter? Ja, sag ruhig noch?

S7: Die Kugel ist schwerer. Also der Würfel aus der Kugel. Und der Würfel aus dem Stein ist leichter.

L: Sehr schön.

1:13:17 Ende: Sichern -> Jahrmarktbild Besprechung

Jahrmarktbild-Besprechung der Auftriebsvorstellung

2:25:23 Start: Sichern -> Jahrmarktbild

L: So, dann haben wir ja jetzt... Einmal noch Ruhe bitte. Wir haben ja jetzt einmal die Auftriebsvorstellung der Dichte kennengelernt, mit der wir erklären können, warum etwas aufsteigt, schwebt oder sinkt. Ich schreibe hier mal Auftriebsvorstellungen hin. Und mithilfe dieser Vorstellung wollen wir jetzt versuchen, eure Fragen, die ihr (unv.) gestellt habt, die noch verbleiben, zu klären. Vielleicht fangen wir einfach erst einmal mit den Enten an. Ihr fragt, warum gehen die Enten runter, warum schwimmen die Enten auf dem Wasser. So, vielleicht bevor wir erstmal klären, warum Enten da unter gehen, klären wir doch vielleicht erstmal, warum die Enten schwimmen können. Also, was könnt ihr über die Dichte der Enten aussagen, die schwimmen? Was könnt ihr über die Dichte der Enten aussagen, die schwimmen? Was habt ihr gerade gelernt? Ja? Ne du. Ich kann die Namen leider nicht, das ist aber auch ganz praktisch für die Kameras, dass ich dann da nicht immer alles rausschneiden muss, wenn ich eure Namen sage. Deswegen kann ich nur zeigen.

S6: Eh die (L: Die Anderen bitte leise!) Dichte der Enten ist höher als die vom umliegenden Stoff?

L: Okay, was meinen die anderen dazu? Kannst du nochmal einmal lauter sagen, wiederholen?

S6: Die Dichte der Enten, die oben sind, ist geringer als die Dichte vom umliegenden Stoff.

L: Was ist denn der umliegende Stoff?

S6: Die Luft.

S18: Die Dichte der Enten ist gleich groß oder kleiner als die Dichte des Wassers?

L: Nochmal lauter, das haben glaube ich nicht alle mitbekommen.

S18: Die Dichte der Enten ist gleich groß oder kleiner als die Dichte des Wassers.

L: Was meinen die anderen dazu?

S7: Die Dichte der Enten ist geringer als die des Wassers?

L: Ganz genau. Gleich groß - was wäre denn, wenn die Dichte gleich, genauso groß, wäre, wie die vom Wasser? Wenn die Dichte der Ente genauso groß wäre, wie die vom Wasser?

S3: Die Enten würden unter Wasser schweben.

L: Genau. Ja, dann sind ja jetzt noch die Fragen offen, warum gehen die Enten unter?

Erstmal, was können wir über die Dichte sagen, über die Dichte der Enten, die untergeht?

Was können wir darüber sagen?

S20: Die muss höher sein, als die Dichte des Wassers.

L: Nochmal lauter.

S20: Die muss höher sein, als die Dichte des Wassers.

L: Ganz genau. Woran könnte das liegen? Also, wieso ist die Dichte von den einen Enten größer und die gehen unter, und warum ist die Dichte von den anderen kleiner und die steigen auf? Hat da jemand eine Idee?

S7: Vielleicht ist in die Ente Wasser reingekommen?

L: Gute Vermutung. Sehr schön. Dann noch die Luftballons. Probieren wir es da einmal aus. Warum fliegen die Ballons auf dem Jahrmarkt und warum fliegen sie zu Hause nicht? Das habt ihr beides gefragt. Vielleicht klären wir erstmal wieder, warum fliegen die Ballons auf dem Jahrmarkt. Oder was können wir über die Dichte der Ballons aussagen, auf dem Jahrmarkt, die nach oben steigen? Bitte?

S3: Die Dichte des Ballons ist geringer als die Dichte der Luft, weil da eben Helium drin ist.

L: Das war eine traumhafte Erklärung. Sehr schön. Ganz genau. Gesundheit. Und was ist mit den Ballons zu Hause? Warum fliegen die nicht? Der Junge weint und sagt zuhause meine Ballons, die fliegen nicht zu Hause. Woran könnte das liegen? Oder klären wir da auch

erstmal, was können wir über die Dichte der Ballons zu Hause aussagen, die nicht fliegen?
Bitte.

S: Die Dichte des Ballons, die nicht fliegen, ist höher (L: Laut) als die Dichte von der umliegenden Luft.

L: Genau. Sehr gut. Und woran könnte das liegen?

S20: Weil da vermutlich dann kein Helium drin ist.

L: Ganz genau. Was ist da meistens drin, wenn man zu Hause Luftballons hat?

S23: Luft?

L: Luft. Ganz genau. Aber das ist ja irgendwie komisch, oder? Also Luft im Ballon und die Luft außenrum. Das hat doch eigentlich die gleiche Dichte, oder nicht? Also warum - dann müssen die Ballons ja eigentlich schweben die ich zu Hause mit der Luft aufpuste? Das ist jetzt eine sehr schwierige Frage.

S20: Die gehen halt nicht komplett hoch, weil ein Ballon, der ist ja auch (unv.) kann ja auch, ist ja auch wie ein Ball...

L: Ein bisschen nochmal lauter. Das versteht man ganz schlecht.

S20: Der ist ja... Also die haben die selbe Dichte, aber zum Beispiel ein Ball, der würde ja direkt runterfallen. Ein Ballon kann aber ja schon ein bisschen schweben, wenn man den irgendwie hochwirft, dann schwebt der auch irgendwie weiter. Aber ich glaub weil der Ballon, die Außenhülle hat ja auch noch ein bisschen Gewicht, dass die dann nicht ganz so schwer eh ein bisschen schwerer ist als die Luft außenrum.

L: Ja schwierig. Tatsächlich liegt es daran, dass wir noch das von dem Ballon mit berücksichtigen müssen. Wir müssen ja die Dichte von dem gesamten Ballon betrachten. Und der besteht ja nicht nur aus Luft, sondern eben auch noch aus Gummi. Und dieses Gummi kommt noch zusätzlich dazu. Deswegen ist die gesamte Dichte von dem Ballon, der mit Luft gefüllt ist, größer als die Dichte der umliegenden Luft. Und deswegen sinkt der Luftballon zu Hause. Gut!

2:33:46 Ende: Sichern -> Jahrmarktbild

A.4.2 E2

Reflexionsaufgabe der Würfelvorstellung

Start S2150001: 29:46: Erschließen -> Reflexionsaufgabe

L: Gut. Dann erzählt mal, was ihr gerade besprochen habt. Also was ist da jetzt erstmal das Problem?

S7: Also erstmal kläre ich das erste. Mit der Aussage wird im Prinzip nur gesagt, man kann die Sachen nicht vergleichen, solange man nicht von beidem die gleiche Menge nimmt. Und dann guckt. Und unten wäre dann die Frage die geklärt wird Gold ist der schwerste Stoff. Im Verhältnis.

L: Mhm. Was meinen die anderen? Ja?

S27: Also ich sag auch, dass Gold der schwerere Stoff ist, weil auf der linken Seite wiegen zwei Würfel 40 Gramm. Wenn man rechts guckt, wiegen, wenn Eisen 40 Gramm wiegen soll, sind es fünf Würfel. Das sind ja mehr als bei Gold und deswegen ist ja eigentlich logisch, dass Gold dann schwerer ist. Und dasselbe ist dann auch bei 80 Gramm.

L: Mhm.

S2: Man kann auch einfach die Grammanzahl durch die Zahl teilen, die Anzahl der Würfel. Wenn ich jetzt 10 Würfel habe, wie bei dem Beispiel links von den Eisenwürfeln, kann ich einfach 80 durch 10 teilen.

L: Und was käme dann raus?

S2: 8 Gramm.

L: Und was würde das bedeuten? Was sagt uns dieses Ergebnis?

S2: Ein Eisenwürfel wiegt 8 Gramm und das gleiche kann man auch mit dem Gold machen. 40 durch 2 sind 20 und ein Goldwürfel wiegt dann 20 Gramm. Das heißt, Gold ist schwerer als Eisen.

L: Das heißt, du würdest alles auf einen Würfel runterrechnen. Sehr gut. Also können wir jetzt sagen, dass Gold schwerer ist als Eisen? Ich glaube Malia würde euch da widersprechen. Da fehlt noch ein kleiner Zusatz.

S16: Ich glaube, es kommt auch auf die Mengen drauf an. Wie viel – zum Beispiel, wenn man jetzt 100 Eisenwürfel hat und nur einen Goldwürfel, ist ja klar, dass die Eisenwürfel mehr wiegen. Aber wenn man jetzt einen Eisenwürfel und einen Goldwürfel, dann könnte man das besser beurteilen.

L: Genau. Sehr gut. Aber wie können wir das dann ausdrücken? Was würden wir sagen? Wie können jetzt nicht sagen, Gold ist schwerer als Eisen, weil wie du gerade ganz genau richtig gesagt hast, je nachdem wie viel man eben von den Stoffen nimmt, ist dann eben mal der eine oder mal der andere Stoff schwerer.

S7: Wenn man im Verhältnis sieht, ist Gold schwerer als Eisen.

L: Ganz genau. Darauf wollte ich hinaus. Das ist verhältnismäßig. Hier ist Eisen schwerer als Gold, hier ist Gold schwerer als Eisen, das sehen wir. Aber verhältnismäßig, da ist nur ein Stoff schwerer. Nämlich Gold. Gut. In der Chemie und auch in anderen Naturwissenschaften sagen wir nicht immer, das ist verhältnismäßig schwerer als das, dieser Stoff ist verhältnismäßig schwerer als der Stoff, sondern wir nutzen dafür eine ganz bestimmte Stoffeigenschaft und zwar die Dichte. Die Dichte hilft uns dabei zu sagen, welcher Stoff verhältnismäßig schwerer ist. Und über die Dichte wollen wir jetzt etwas mehr erfahren.

Ende: S2150002: 03:32

Reflexionsaufgabe der Auftriebsvorstellung

Start: S2160001: 24:40 Erschließen -> Reflexionsaufgabe

L: Gut, dann sammeln wir einmal. Also fangen wir einmal an: Wie können wir mit dem Schokoriegel-Experiment erklären, warum Chloe falsch liegt? Warum das Volumen, also die Größe, eben nicht entscheidend ist, ob etwas schwimmt oder sinkt. Ja.

S9: Die Größe ist nicht entscheidend ob das schwimmt oder sinkt, weil zum Beispiel in dem Milky Way und Bounty Experiment, da haben wir ja auch den Bounty-Riegel kleiner geschnitten und trotzdem hat der nicht geschwommen.

L: Ganz genau, sehr schön. Sehr schön erklärt. Dann Jerome. Die Masse ist entscheidend. Wieso liegt Jerome falsch? Wie können wir das erklären mit dem Schokoriegel-Experiment? Ja.

S2: Weil wir haben ja auch - jetzt wieder mit dem Bounty und dem Milky Way – wir haben ja den Bounty kleiner geschnitten und der war ja dann auch leichter. Wir haben den ja durchgeschnitten und dass der dann leichter als der Milky Way ist und er ist ja trotzdem nicht geschwommen.

L: Ganz genau. Sehr schön. Also weder Volumen, noch Masse ist entscheidend dafür, ob jetzt etwas schwimmt oder sinkt. Aber was ist denn jetzt entscheidend? Ja haltet das mal zurück, ihr sollt das jetzt nämlich einmal herausfinden. Indem ihr Arbeitsblatt eins und Merktzettel 2 bearbeitet.

Ende S2160001: 26:47

Jahrmarktbild-Besprechung der Würfelvorstellung

Start S2150002: 28:39: Sichern -> Jahrmarktbild Besprechung Stärkewettbewerb

L: Gehen wir nochmal einmal zurück auf das Jahrmarktbild. Ziel war es ja, dass wir die Fragen beantworten können, zumindest erstmal hier oben die Fragen. Ich mach mal hier ein bisschen Platz und schieb mal die Fragen ein bisschen weg. Versuchen wir mal die Fragen zu beantworten. Starten wir mal hier mit der Frage: Was stimmt nicht? Vielleicht kann das erstmal einer sagen: Was ist an dieser Situation seltsam? Bei diesem Stärkewettbewerb. Was stimmt da nicht? Ja?

S16: Also das Gewicht da an sich ist schwerer als der große Stein und der noch größere Stein. Ne das ist leichter aber es sieht so aus als wenn das schwerer ist.

L: Wie kommst du darauf, dass es so aussieht?

S16: Weil es größer ist.

L: Mhm. Was meinen die anderen? Was ist komisch an dieser Situation?

S2: Dass halt dieses kleine Mädchen, ich schätze mal es ist ein Kind, von der Größe mehr heben kann als der starke Mann.

L: Genau, das ist irgendwie ein bisschen komisch, ne? Hier steht ja auch, warum kann der mehr Gewicht heben, warum wiegt das grüne Teil mehr als die Steine, das Gegenüber, wieso kann das Kind so einen großen Stein tragen. Jetzt die Frage, habt ihr eine Vermutung, woran das liegen könnte? Wie man das erklären kann, warum jetzt hier dieser Mann sich mit diesem kleinen Ding da so abmüht und dieses Kind da mühelos diesen riesen Stein da heben kann.

S12: Vielleicht ist der Stein gar kein Stein, sondern Styropor oder so.

L: Und warum - was hat das dann damit zu tun, kannst du das nochmal genau erklären?

S12: Ja, vielleicht, weil Styropor ist ja leichter wie der Stein und deswegen kann das Kind vielleicht das besser heben.

L: Was meinen die anderen? Ich gebe euch mal einen Hinweis: Wir haben ja gerade den Merkzettel besprochen und da hatten wir ja die Würfelvorstellung der Dichte kennengelernt. Das schreibe ich hier mal so hin: Würfelvorstellung. Wenn wir uns jetzt mal hier die Stoffe, die einzelnen Objekte, wenn wir uns die mal vorstellen, dass die aus so kleinen, aus so kleinen Würfeln bestehen. Ich zeichne die einfach mal so ein. So, wie können wir jetzt mit Hilfe dieser Würfelvorstellung der Dichte erklären, dass dieser Mann da diesen kleinen Klotz kaum heben kann und das Kind ganz einfach? Ja.

S23: Weil in dem größeren Stein vielleicht die Dichte nicht so dicht, also die Masse nicht so dicht ist, wie bei dem grünen Gewicht. Zum Beispiel in dem grünen Gewicht, die bestehen ja meistens aus Beton oder so und da kommen ja schnell Bläschen rein. Und dann sind da ja überwiegend Löcher.

L: Mhm. Ja du hast am Anfang schon ganz viel richtig gesagt, aber so ein bisschen die Begriffe durcheinander geworfen. Masse, Dichte. Wer kann das nochmal erklären mit den Würfeln und der Dichte und jetzt hier diesen? Ja?

S20: Also ich glaube, dass dieses Gewicht, das der Mann hebt, das hat eine größere Dichte als das von diesem Stein. Das kann man auch eigentlich daran sehen, wenn man jetzt von jedem einen Kubikzentimeter nimmt und das dann wiegen würde, dann könnte man da ja auch sehen, was schwerer ist.

L: Ganz genau. Schön.

Ende: S2150003: 03:47

Jahrmarktbild-Besprechung der Auftriebsvorstellung

Start: S2160002: 20:50 Sichern -> Jahrmarktbild

L: Also, mit Hilfe der Dichte können wir also sagen, mit Hilfe der Auftriebsvorstellung, wann etwas aufsteigt, schwebt oder sinkt. Das wollen wir uns jetzt nochmal bei diesem Jahrmarktbild anschauen. Und jetzt die Auftriebsvorstellung, die ihr kennengelernt habt, dafür nutzen. Starten wir doch hier mal mit den Enten und versuchen hier jetzt die Auftriebsvorstellung, die ihr gerade kennengelernt habt, zu nutzen, um zu erklären, warum hier die Enten untergehen. Vielleicht erstmal, bevor wir klären warum die Enten untergehen, klären wir erstmal: Was könnt ihr über die Dichte der Enten sagen, die schwimmen? Ja.

S18: Da ist die Dichte genauso viel wie das Wasser. Achso ne dann war das, da ist die Dichte niedriger.

L: Sehr gut. Ja. Und was können wir über die Dichte sagen von den Enten die untergehen, die zu Boden sinken. Wie muss die Dichte von diesen Enten sein? Ja?

S9: Die Dichte ist größer als die vom Wasser.

L: Sehr gut. Habt ihr eine Idee, woran das vielleicht liegen könnte? Warum ist die Dichte von den Enten größer die zu Boden sinken? Habt ihr da eine Idee wie das passiert sein könnte? Ja?

S20: Vielleicht weil da Wasser oder so reingekommen ist?

L: Ja genau, das ist eine gute Idee. Gibt's noch eine andere Erklärung? Ja?

S27: Wenn das echte Enten wären und die dann tot wären, dann haben die ja keinen Sauerstoff mehr im Körper und gehen die auch irgendwann unter.

L: Joar, auch eine schöne Erklärung. Ja?

S7: Vielleicht wurde bei denen ein bisschen zu viel mit Gummi gefüllt oder irgendwas anderem.

L: Ja, auch das ist möglich. Sehr gut, schön. Dann versuchen wir jetzt noch, das mit den Ballons zu klären. Auch da, auch mithilfe der Auftriebsvorstellung, versuchen wir das jetzt zu klären. Fangen wir erstmal an wieder zu erklären, warum fliegen überhaupt hier diese Ballons? Was könnt ihr über die Ballons hier sagen, über die Dichte dieser Ballons, die nach oben steigen? Ja.

S16: Da ist Helium drin.

L: Vermutlich, ja. Was kannst du dann über die Dichte sagen? Also es ist erstmal richtig, dass die mit Helium gefüllt sind, aber was hat das jetzt mit der Dichte auf sich? Warum, wenn da Helium drin ist, warum steigen die dann nach oben?

S2: Weil Helium leichter als Wasser ist?

L: Was meinen die anderen dazu? Weil Helium leichter als Wasser ist. Ja?

S9: Weil die Dichte von Helium leichter als die Dichte von Luft ist?

L: Sehr gut, ist schon ganz nah dran. Ein kleiner Fehler hat sich da eingeschlichen. Kannst du es nochmal laut sagen was du gerade gesagt hast?

S9: Weil die Dichte von Helium leichter als die Dichte von Luft ist.

L: Ja?

S23: Weil die Dichte von Helium niedriger ist als von Luft?

L: Genau. Du meinst genau das richtige, es war nur diese sprachliche Ungenauheit (unv.). Sehr schön. Ja und die Ballons zuhause die schweben bei dem Jungen nicht, warum? Können wir das erklären? Also was können wir erstmal wieder über die Dichte der Ballons aussagen, die der Junge zuhause hat, wenn die nicht schweben, äh aufsteigen, sondern zu Boden sinken? Ja?

S20: Vielleicht hat der zuhause einfach normale Ballons mit Luft drin.

L: Und wie ist dann die Dichte dieser Ballons? Wie muss die sein, damit der zu Boden sinkt?
Ja?

S18: Also, weil, ich schätze mal, dass der die ganz normal aufgepustet hat, also mit normaler Luft. Genau, und weil das ja gleich schwer ist und dann ist der Ballon, das Gewicht von dem Ballon, ist ja auch noch dabei, dann ist das insgesamt halt schwerer als, äh nein, dann ist die Dichte höher als die Luft glaube ich.

L: Genau, sehr gut. Ja das ist – im Alltag sagt man immer „Ja, das ist schwerer, deswegen geht das unter. Das ist leichter, das steigt nach oben“, aber wir haben ja gerade gesehen, bei den Bounty-Riegeln, dass es eben nicht daran liegt, ob etwas schwerer oder leichter ist, sondern es liegt wirklich an der Dichte. Deswegen muss man da ein bisschen – das rauszubekommen, dass man dann wirklich das mit der Dichte erklärt und nicht mehr sagt „das ist schwerer oder leichter“, das ist schwierig. Aber es ist leider richtig. Schön.

Ende S2160002: 26:38

A.5 Evaluationsergebnisse von E2

Tabelle A.5.1*Antwortfähigkeiten zur Bewertung der Unterrichtskonzeption mit begleitenden Lernmaterialien (E2)*

Kategorie	Item	x	--	-	0	+	++
Struktur und Verständlichkeit	Übersichtlichkeit $\bar{t}$	0	0	0.5	3.25	9.75	4
	Orientierung $\bar{t}$	0	0	1	4	8	4
	Aufgabenverständlichkeit $\bar{t}$	0	0.5	0.5	4.5	6	4
	Schwierigkeitsgrad Schieberegler überfordernd t_2	1	2	3	6	5	0
Spaßfaktor	Aufgaben zu schwierig $\bar{t}$	0.5	0.5	3	10.5	2.5	0.5
	Schreibaufwand gering $\bar{t}$	0.5	1	1	3	7.5	4.5
	Experimente t_1	0	0	0	2	5	10
Unterstützungsmaßnahmen	Simulation t_2	0	0	0	6	4	7
	Aufgaben $\bar{t}$	0.5	0	1	4.5	7	4.5
	Bebilderung der Versuche t_1	1	1	0	4	8	4
	Abhaken der Versuchsschritte t_1	1	3	1	4	6	3
	Tipps zur Simulation t_2	1	0	2	6	5	3
	Paararbeit $\bar{t}$	0	0.5	1.5	2.5	6.5	6
	Plenumsdiskussionen $\bar{t}$	0	0	1	4	10	2.5
	Aufgabenüberschrift $\bar{t}$	0	0.25	1.75	5	8.5	2

Kategorie	Item	x	--	-	0	+	++
Wirkungsweise Designelemente	kogn. Konflikt (Experiment) t_1	1	1	1	4	6	5
	Relevanz von Inhalten (Merkzettel) $\bar{t}$	0	0	0	3.5	9.5	5
	Überblick (Jahrmarktbild) $\bar{t}$	0.5	0.75	1.75	6	4	5
	Orientierung (Jahrmarktbild) $\bar{t}$	1	0.25	0.75	5	6.5	4
Grundvorstellun- gen	Vorstellbarkeit (Würfelvorst.) t_1	0	1	5	4	8	0
	Verständlichkeit (Würfelvorst.) t_1	1	0	2	4	10	1
	Nutzen (Würfelvorst.) t_1	0	0	2	3	9	4
	Verständlichkeit (Auftriebsvorst.) t_2	0	0	2	5	9	2

Anmerkung. x = Kann ich nicht sagen, -- = Ich stimme überhaupt nicht zu, - = Ich stimme nicht zu, 0 = Ich bin neutral, + = Ich stimme zu, ++ = Ich stimme völlig zu. t_1 = Evaluationsergebnisse nach der ersten Unterrichtseinheit, t_2 = Evaluationsergebnisse nach der zweiten Unterrichtseinheit, $\bar{t}$ = arithmetischer Mittelwert der Evaluationsergebnisse von t_1 und t_2 .

A.6 Detaillierte InterCoder-Reliabilitäten zur Testauswertung

Tabelle A.6.1

InterCoder-Reliabilitäten der Testauswertung nach den drei Codierprozessen auf verschiedenen Codeebenen

Item	Codeebene	C ₁		C ₂		C ₃	
		κ	N	κ	N	κ	N
1	Begründung	.98	49	.93	192	.94	192
	Begründung (Sub)	.87	24	.95	66	.80	53
	Relation	.75	37	.90	145	.88	141
2	Begründung	.97	35	.85	125	.94	127
	Begründung (Sub)	.87	15	.90	45	1.00	40
	Relation	.74	17	.85	62	.95	62
3	Hauptcode	.79	47	.81	192	.91	177
	Masse pro cm ³ -Würfel (Sub)	nan	0	-.11	18	.45	22
	Masse ver-hältnismäßig vergleichen (Sub)	notDef	1	1.00	8	.71	7
	Auftrieb (Sub)	.00	4	.50	16	1.00	10

Item	Codeebene	C ₁		C ₂		C ₃	
		κ	<i>N</i>	κ	<i>N</i>	κ	<i>N</i>
4	Antwort	.70	25	.90	97	.97	98
	Begründung	.74	23	.70	54	.93	66
5	Hauptcode	.76	28	.92	121	.90	115
	Masse pro cm ³ (Sub)	.81	16	.77	59	.81	48
	Masse pro cm ³ - Würfel (Sub)	notDef	1	notDef	5	1.00	6
	Rechnung (Sub)	.33	6	.70	5	.83	18

Anmerkung. C₁ = erster Codierprozess mit 22 Dokumenten (11 %); C₂ = zweiter Codierprozess mit 84 Dokumenten (43 %); C₃ = dritter Codierprozess mit 90 Dokumenten (46 %); κ = Kappa-Wert nach Brennan und Prediger (1981); *N* = Anzahl der codierten Segmente; Sub = Subcodeebene.

A.7 Ergebnisse statistischer Tests

A.7.1 Ergebnisse E3

Tabelle A.7.1

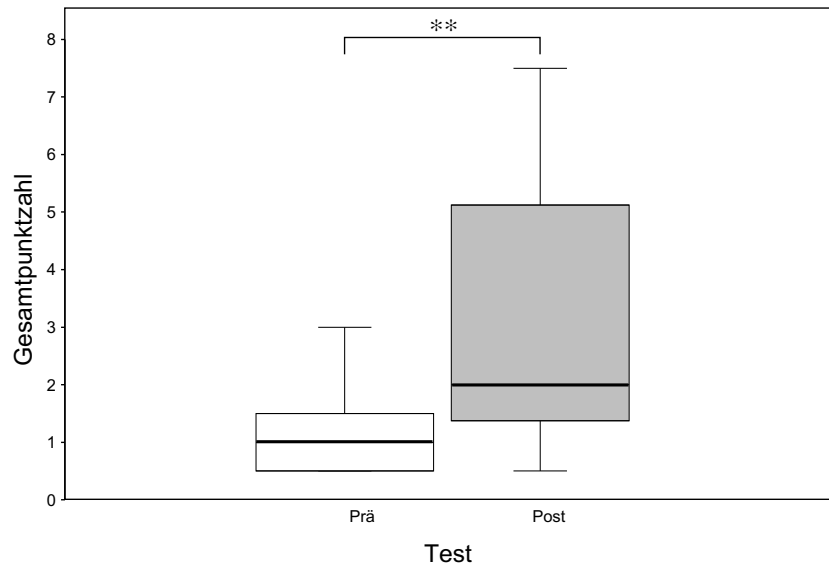
Detaillierte Ergebnisse des Friedman-Tests und der Conover-Post-hoc-Tests für die itemspezifischen Analysen von E3

Item	$\chi^2(2)$	p	Prä (Mdn)	Post (Mdn)	Follow- up (Mdn)	Prä vs. Post $t(46)$ ($p_{\text{angepasst}}$)	Prä vs. Follow-up $t(46)$ ($p_{\text{angepasst}}$)	Post vs. Follow-up $t(46)$ ($p_{\text{angepasst}}$)
1	21.8	<.001	0.50	2.50	1.50	5.94 (<.001)	4.48 (<.001)	1.46 (.46)
2	16.6	<.001	0.00	0.50	0.25	4.66 (<.001)	3.73 (.002)	0.93 (1.07)
3	29.2	<.001	0.00	1.00	0.25	6.44 (<.001)	4.63 (<.001)	3.81 (.001)
4	11.1	.004	0.00	0.00	0.00	3.54 (.003)	2.76 (.025)	0.77 (1.33)
5	12.4	.002	0.00	0.50	0.00	3.94 (<.001)	2.54 (.04)	1.40 (.51)

Anmerkung. $p_{\text{angepasst}}$ = Bonferroni-korrigierte p -Werte der paarweisen Conover-Post-hoc-Vergleiche.

Abbildung A.7.1

Vergleich der Gesamtpunktzahl von Prä- und Post-Test (E2)

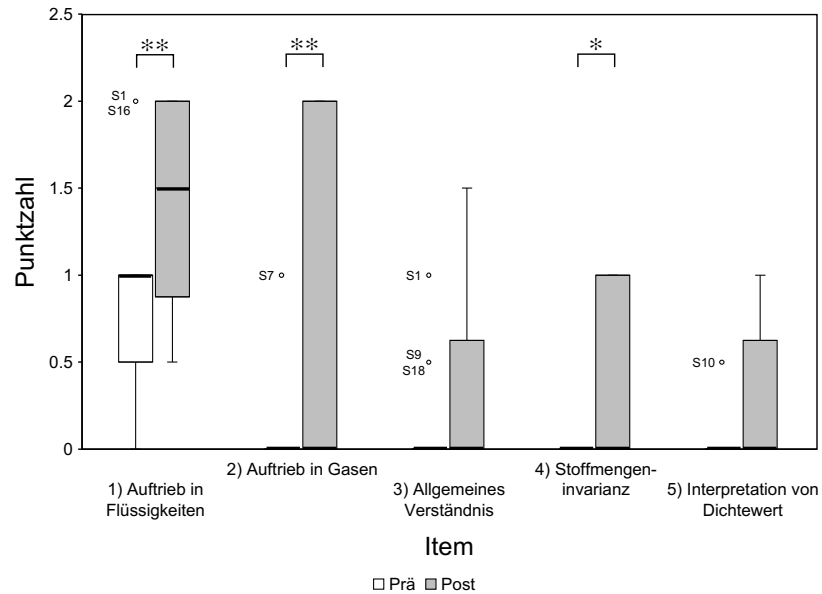


Anmerkung. ** $p < .01$.

A.7.2 Ergebnisse E2

Abbildung A.7.2

Vergleich der itemspezifischen Ergebnisse von Prä- und Post-Test (E2)



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

Tabelle A.7.2

Detaillierte Ergebnisse der Wilcoxon-Tests für die itemspezifischen Analysen von E2

Item	Prä (Mdn)	Post (Mdn)	z	p
1	1.00	1.50	-2.70	.006
2	0.00	0.00	-2.59	.008
3	0.00	0.00	-1.29	.313
4	0.00	0.00	-2.45	.031
5	0.00	0.00	-2.01	.063

B Materialien zur Unterrichtskonzeption magic

B.1 Würfelvorstellung

Wie kann man die Masse von Stoffen verhältnismäßig vergleichen?
Erkunden

① „schwere“ Stoffe

a) Welche Stoffigkeit besteht aus dem „schwersten“ Stoff? Finde es heraus.
Dafür brauchst du: eine Waage, eine Schere, ein Marshmallow, ein Lakritzbonbon, eine Speckmaus.



das Marshmallow



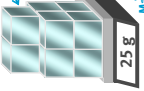
das Lakritzbonbon



die Speckmaus

Notizen:

b) Unten siehst du Objekte aus verschiedenen Stoffen. Welcher ist der „schwerste“ Stoff? Begründe.
Hinweis: Deine Erkenntnisse aus Aufgabe a) können dir helfen.



Glas
 $V = 10 \text{ cm}^3$
 $m = 25 \text{ g}$



Kohlenstoff
 $V = 8 \text{ cm}^3$
 $m = 16 \text{ g}$



Nickel
 $V = 2 \text{ cm}^3$
 $m = 18 \text{ g}$

Notizen:

Begründung:

Wie kann man die Masse von Stoffen verhältnismäßig vergleichen?

Erschließen

② Probleme beim Vergleichen „schwerer“ Stoffe

Was genau meint Malia? **Tausche** dich mit deiner Partnerin/deinem Partner aus. Welcher Stoff ist verhältnismäßig am schwersten? **Begründe.**

Eisen
 $V = 10 \text{ cm}^3$
 $m = 80 \text{ g}$

Gold
 $V = 2 \text{ cm}^3$
 $m = 40 \text{ g}$

Eisen
 $V = 5 \text{ cm}^3$
 $m = 40 \text{ g}$

Gold
 $V = 4 \text{ cm}^3$
 $m = 80 \text{ g}$

Chloe

Eisen ist schwerer als Gold!

Leo

Nein! Gold ist schwerer als Eisen!

Das kann man so gar nicht sagen! Man kann nur sagen, welcher Stoff **verhältnismäßig** – also bezogen auf das gleiche Volumen – schwerer ist!

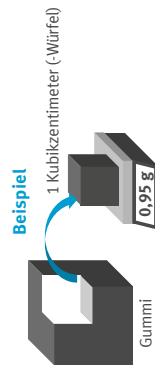
Begründung: _____ ist **verhältnismäßig** am schwersten, weil _____

③ Masse von Stoffen verhältnismäßig mithilfe der Dichte vergleichen

In der Chemie nutzt man die Stoffeigenschaft **Dichte**, um die Masse von Stoffen **verhältnismäßig** zu vergleichen.

- a) Erfahre mehr über die Dichte! **Schaue** dir das Video zu der Aufgabe auf der Website an (unter Tipps). **Schreibe** wichtige Informationen aus dem Video auf, indem du die Lücken vervollständigst.

Die Dichte ist eine _____, Sie gibt an, wie viel ein _____ eines Stoffes wiegt.



Wir beobachten: Ein Kubikzentimeter(-Würfel) Gummi _____ 0,95 Gramm.

Wir sagen: Die Dichte von Gummi beträgt 0,95 _____ pro _____

Wir schreiben: $\rho(\text{Gummi}) = 0,95 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ pro _____

© Institut für Didaktik der Chemie | Universität Münster | Pascal Meyer & Annette Marohn | v1.4

Wie kann man die Masse von Stoffen verhältnismäßig vergleichen?

Erkunden

① „schwere“ Stoffe

Unten siehst du Würfel aus verschiedenen Stoffen.

a) **Scanne** den Kasten und bestimme die Massen der Würfel.

Gold

$V = 1 \text{ cm}^3$
 $m = \underline{\hspace{2cm}}$

Eichenholz

$V = 1 \text{ cm}^3$
 $m = \underline{\hspace{2cm}}$

Eisen

$V = 1 \text{ cm}^3$
 $m = \underline{\hspace{2cm}}$

Kupfer

$V = 1 \text{ cm}^3$
 $m = \underline{\hspace{2cm}}$

0,00 g

$V = 3 \text{ cm}^3$
 $m = \underline{\hspace{2cm}}$

0,00 g

$V = 4 \text{ cm}^3$
 $m = \underline{\hspace{2cm}}$

0,00 g

$V = 6 \text{ cm}^3$
 $m = \underline{\hspace{2cm}}$

b) Welcher ist der schwerste **Würfel? Kreise** ihn ein.

c) Welcher ist der „schwerste“ Stoff? **Begründe.**

Begründung: _____ ist der „schwerste“ Stoff, weil _____

d) Unten siehst du Objekte aus verschiedenen Stoffen. Welcher ist der „schwerste“ Stoff? **Begründe.**

Hinweis: Deine Erkenntnisse aus Aufgabe a) können dir helfen.

Glas
 $V = 10 \text{ cm}^3$
 $m = 25 \text{ g}$

Kohlenstoff
 $V = 8 \text{ cm}^3$
 $m = 16 \text{ g}$

Nickel
 $V = 2 \text{ cm}^3$
 $m = 18 \text{ g}$

Notizen:

Begründung: _____

© Institut für Didaktik der Chemie | Universität Münster | Pascal Meyer & Annette Marohn | v1.4



Wie kann man die Masse von Stoffen verhältnismäßig vergleichen?

Vertiefen

5 Die Dichte bestimmen

a) Bestimme die Dichte der einzelnen Stoffe.

$V = 3 \text{ cm}^3$
 $m = 12 \text{ g}$
12 g

$m = 20 \text{ g}$
 $V = 4 \text{ cm}^3$
20 g

$m = 54 \text{ g}$
 $V = 6 \text{ cm}^3$
54 g

10 cm^3 Öl wiegen 9 g
9 g

12 g werden gleichmäßig auf 3 Kubikzentimeter (-Würfel) verteilt.
werden gleichmäßig auf _____ Kubikzentimeter (-Würfel) verteilt.

$$\rho = \frac{12 \text{ g}}{3 \text{ cm}^3} = \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = \rho = \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = \rho =$$

b) Häufig muss man Masse und Volumen erst noch bestimmen, bevor man die Dichte berechnen kann. Scanne den Kasten und bestimme Masse und Volumen der einzelnen Objekte, indem du jeweils ein Objekt mit geeigneten Messgeräten kombinierst.

Notiere die Werte in der Tabelle. Berechne die Dichte der Objekte.

Hinweise: 1 ml ist das Gleiche wie 1 cm³.

Objekte

Schlüssel

Spülmaschinentab

USB-Stick

Kugelschreiber

Messgeräte

Waage

Lineal

Messzylinder

Objekt	Masse	Volumen (ggf. mit Rechnung)	Dichte
	$m = \text{g}$	$V =$	$\rho = \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$

4



Wie kann man die Masse von Stoffen verhältnismäßig vergleichen?

Erschließen

b) Warum ist schwer nicht gleich *dicht*? Schaue dir unten das Beispiel an und tausche dich mit deiner Partnerin/ deinem Partner darüber aus. Vervollständige anschließend die beiden Sätze.

1 Kubikzentimeter (-Würfel)
200 g

1 Kubikzentimeter (-Würfel)
19,3 g

Die Gummikugel ist _____ als die Goldkugel, weil sie viel mehr Volumen hat.
Trotzdem ist Gold **dichter** als Gummi, weil _____

4 Die Dichte bestimmen

Hilf Jerome und bestimme die Dichte von Nickel. Vervollständige dazu den Lückentext und **kreuze** an.



18 g

$V = 2 \text{ cm}^3$
 $m = 18 \text{ g}$

Ich muss also herausfinden, wie viel ein Kubikzentimeter (-Würfel) Nickel wiegt.
 $V = 2 \text{ cm}^3$ und $m = 18 \text{ g}$ bedeuten, dass _____ Kubikzentimeter (-Würfel) 18 g _____.

Wenn man die 18 g gleichmäßig auf die 2 Kubikzentimeter (-Würfel) verteilt, bekommt jeder Würfel _____ g ab.
Die Dichte von Nickel beträgt somit _____ $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$.

Dafür musste ich ☐ $18 \text{ g} - 2 \text{ cm}^3$ ☐ $18 \text{ g} : 2 \text{ cm}^3$ ☐ $2 \text{ cm}^3 : 18 \text{ g}$ rechnen.

Die Formel für die Dichte lautet deshalb auch: $\rho = \frac{m}{V}$ ☐ $\rho = m - V$ ☐ $\rho = \frac{V}{m}$

3



Merkmale ausfüllen!

Wie kann man die Masse von Stoffen verhältnismäßig vergleichen?

Vertiefen

7 Zusammenhang zwischen Dichte, Masse und Volumen

- a) Welche Zusammenhänge gibt es zwischen Masse, Dichte und Volumen? **Erkläre** es, indem du die Texte korrigierst. **Streiche** dazu nicht zutreffende Begriffe durch. **Überprüfe** die Texte mithilfe der Simulation.

Zusammenhang zwischen Dichte und Volumen

Vergößert man nur das Volumen, muss die gleiche Masse auf **mehr** **weniger** gleich viele Kubikzentimeter (-Würfel) verteilt werden. Deshalb bekommt jeder Kubikzentimeter (-Würfel) **mehr** **weniger** gleich viel Masse ab. Die Dichte **nimmt zu** **nimmt ab** bleibt gleich.

Zusammenhang zwischen Dichte und Masse

Vergößert man nur die Masse, muss mehr Masse auf mehr weniger gleich viel Kubikzentimeter (Würfel) verteilt werden. Deshalb bekommt jeder Kubikzentimeter (-Würfel) mehr weniger gleich viel Masse ab. Die Dichte nimmt zu nimmt ab bleibt gleich.

$m = 12 \text{ g}$

$\rho = \frac{m}{V}$

$V = 4 \text{ cm}^3$

$= \frac{12 \text{ g}}{4 \text{ cm}^3} = 3 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$

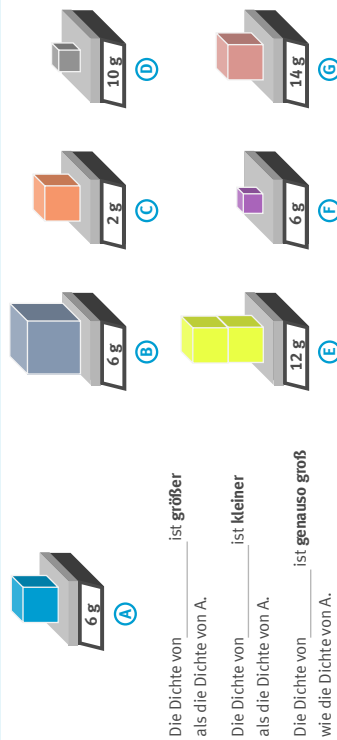
12 g werden gleichmäßig auf 4 Kubikzentimeter (-Würfel) verteilt.



Das ergibt die Masse von einem Kubikzentimeter (-Würfel) bzw. die Dichte.

- b) Bei welchen Objekten ⑧ bis ⑩ ist die Dichte größer als, kleiner als oder genauso groß wie bei ①?

Trage die entsprechenden Buchstaben in die Lücken ein.
Hinweis: Die Erkenntnisse aus **a)** und die Simulation können dir helfen.



©Institut für Didaktik der Chemie | Universität Münster | Pascal Meyer & Annette Marohn | v1.4

Wie kann man die Masse von Stoffen verhältnismäßig vergleichen?

Vertiefen

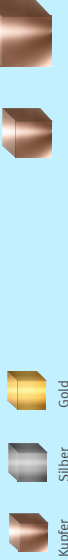
⑥ Die Dichte als Stoffeigenschaft

Stoffeigenschaften sind charakteristisch für einen Stoff und häufig unabhängig vom Volumen eines Stoffes.

Die Stoffeigenschaft „Farbe“ ist...

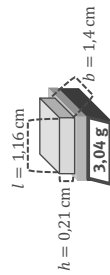
(1)... charakteristisch für einen Stoff Jeder Stoff hat eine ganz bestimmte Farbe.	(2)... unabhängig vom Volumen eines Stoffes Egal wie viel Stoff man nimmt, die Farbe bleibt unverändert.

Egal wie viel Stoff man nimmt, die Farbe bleibt unverändert.



Die Dichte ist auch eine Stoffeigenschaft und somit charakteristisch für einen Stoff. Damit kann man Stoffe leicht bestimmen. **Bestimme** aus welchem Metall die Platte besteht.

Metall	Dichte in $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
Aluminium	2,7
Nickel	8,9
Blei	11,34
Eisen	7,9

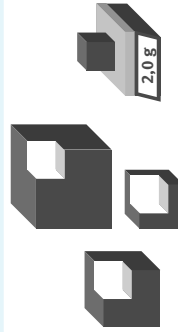


Rechnung:

Antwort:

- b)** Die Dichte gehört zu den Stoffeigenschaften, die unabhängig vom Volumen eines Stoffes sind.
Begründe anhand der Abbildung, warum das so ist.

Tipp?



Begründung:

B.2 Auftriebsvorstellung



Wie kann man erklären, ob etwas aufsteigt, schwebt oder sinkt?

Erkunden

① Schwimmende und sinkende Schokoriegel

Chloe und Jerome laden an einem heißen Sommertag ihre Freunde zu einem Picknick ein. Dafür haben sie unter anderem MilkyWay und Bounty gekauft. Damit die Süßigkeiten nicht in der Sonne schmelzen, werfen sie die Riegel zum Kühlen in den Pool.

Dabei machen sie eine seltsame Beobachtung: Die eine Sorte Riegel steigt nach oben und schwimmt auf dem Wasser, während die andere Sorte zu Boden sinkt.*



Untersuche die seltsame Beobachtung mithilfe der folgenden Experimente genauer.

Dafür brauchst du: eine Schere, eine Kristallisierschale (Ø 9 cm), eine Waage, ein MilkyWay, ein Bounty, Wasser.

- a) **Untersuche** die beiden Schokoriegel **i)** und **stelle** eine begründete Vermutung auf, welche der beiden Sorten aufsteigt und auf dem Wasser schwimmt **ii)**. **Überprüfe** anschließend deine Vermutung **iii)**.

i) Untersuche die beiden Schokoriegel:

Arbeitsschritt erledigt?
Mache einen Haken!

	Nimm die beiden Schokoriegel aus ihrer Verpackung.	☐
	Bestimme die Masse der Riegel indem du sie wiegst. Notiere die Masse der beiden Riegel: _____	☐
	Vergleiche das Volumen der Riegel, indem du sie dir genau anschaust. Beschreibe den Unterschied: _____	☐

ii) Stelle eine Vermutung auf:

	Der _____ - Riegel schwimmt auf dem Wasser, weil _____	☐

iii) Überprüfe deine Vermutung:

	Gib ca. 150 mL Wasser in die Kristallisierschale.	☐
	Gib beide Schokoriegel in die Kristallisierschale. Notiere deine Beobachtung: _____	☐

* In Anlehnung an: Witteck, T., Most, B., & Eilks, I. (2005). Wein und Bier, MilkyWay und Cola. Zwei Beispiele für kooperatives Lernen im Kugellager. In *Naturwissenschaften im Unterricht. Chemie* (Bd. 16, Nummern 88-89, S. 22–27).



Wie kann man erklären, ob etwas aufsteigt, schwimmt oder sinkt?

Erschließen

2 Vorstellungen zum Schwimmen und Sinken

Chloe und Jerome haben unterschiedliche Vorstellungen davon, wann etwas schwimmt oder sinkt. **Erkläre** ihnen mithilfe der Experimente aus **1a** und **1b**, wieso ihre Vorstellungen falsch sind.

Das **Volumen** ist entscheidend. Kleine Gegenstände steigen auf und schwimmen, während große Gegenstände sinken.



Erklärung für Chloe:

Die **Masse** ist entscheidend. Leichte Gegenstände steigen auf und schwimmen, während schwere Gegenstände sinken.



Erklärung für Jerome:

3 Aufsteigen, Schwimmen und Sinken

Zuvor hast du das Schwimmverhalten von Objekten in Flüssigkeiten untersucht. In dieser Aufgabe erfährst du, wann etwas allgemein in Flüssigkeiten oder Gasen aufsteigt, schwimmt oder sinkt.

1a) Scanne den unteren Kasten. **111** Stelle den grauen Würfel auf den Stoff „Wasser“ und den blauen Stoff/Gegenstand auf den Zustand „fest“ ein!!! Lass den blauen Stoff/Gegenstand aufsteigen, schwimmen, sinken oder sinken. Welche Eigenschaft musst du dafür verändern? **Kreuze** an.



Tipp?

Man muss ☐ die Masse (m) ☐ das Volumen (V) ☐ die Dichte (ρ) ☐ die Form verändern.

grauer Würfel

Zustand: gasförmig $m = 0,0036 \text{ g}$

Stoff: Helium $V = 20 \text{ cm}^3$

$\rho = 0,0002 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$

blauer Stoff/Gegenstand

Zustand: fest $m = 2 \text{ g}$

Form: Würfel $V = 1 \text{ cm}^3$

$\rho = 2 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$

111 Stelle mithilfe der Simulation Regeln für das Aufsteigen, Schwimmen und Sinken, indem du die Lücken vervollständigst.

Ist die _____ von dem blauen Gegenstand oder Stoff _____ als die _____ von dem grauen Würfel, **steigt** der blaue Gegenstand oder Stoff **auf**.

Ist die _____ von dem blauen Gegenstand oder Stoff _____ wie die _____ von dem grauen Würfel, **schwimmt** der blaue Gegenstand oder Stoff.

Ist die _____ von dem blauen Gegenstand oder Stoff _____ als die _____ von dem grauen Würfel, **sinkt** der Gegenstand oder Stoff.



Tipp?

111 Stelle den grauen Würfel auf den Stoff „Luft“ ein!!! **Überprüfe** mithilfe der Simulation, ob deine Regeln aus **b** auch in gasförmigen Stoffen gelten.



Tipp?



Merksatz ausfüllen!

© Institut für Didaktik der Chemie | Universität Münster | Pascal Meyer & Annette Marohn | v1.14

8 E

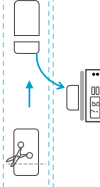


Wie kann man erklären, ob etwas aufsteigt, schwimmt oder sinkt?

Erkunden

b) Kann man den Bounty-Riegel schwimmen lassen? **Schneide** ein kleines Stück von dem Bounty-Riegel ab **i)**. **Stelle** eine begründete Vermutung auf, ob das kleine Stück-Bounty schwimmt oder nicht **ii)**. **Überprüfe** deine Vermutung **iii)**.

i) Schneide den Bounty-Riegel kleiner und leichter:



Schneide ein kleines Stück Bounty mit der Schere ab.

Überprüfe mithilfe der Waage, ob das kleinere Stück Bounty leichter ist als der MilkyWay-Riegel.

Falls nicht, schneide das Stück Bounty kleiner und überprüfe erneut.

ii) Stelle eine Vermutung auf:



Das kleinere und leichtere Stück Bounty wird (schwimmen | nicht schwimmen), weil .

Schneide das nicht Zutreffende durch!

iii) Überprüfe deine Vermutung:



Gib das abgeschnittene Stück Bounty in die Kristallisierschale mit Wasser. Notiere deine Beobachtung:

7.2 E

© Institut für Didaktik der Chemie | Universität Münster | Pascal Meyer & Annette Marohn | v1.14

Wie kann man erklären, ob etwas aufsteigt, schwebt oder sinkt?

Erklären

2 Vorstellungen zum Aufsteigen und Sinken

Unten stehen falsche Vorstellungen zum Aufsteigen und Sinken. Wie kann man die Vorstellungen widerlegen? Finde jeweils ein Gegenbeispiel aus 1a oder 1b .	
Beispiel: Die Farbe entscheidet ob etwas aufsteigt oder sinkt.	Gegenbeispiel: Der rote Ballon sinkt in der Luft, aber steigt im Wasser auf und schwimmt.
Der Aggregatzustand ist entscheidend. Flüssige Stoffe steigen auf und feste Stoffe sinken.	Die Masse ist entscheidend. Leichte Gegenstände steigen auf und schwere Gegenstände sinken.
Das Volumen ist entscheidend. Kleine Gegenstände steigen auf und große Gegenstände sinken.	Die Form ist entscheidend. Runde Gegenstände steigen auf und dünne, spitze Gegenstände sinken.

3 Aufsteigen, Schweben und Sinken

Was entscheidet denn nun, ob etwas aufsteigt, schwebt oder sinkt? Das erfährst du in dieser Aufgabe.

Scanne den unteren Kasten. **!!!** Stelle den grauen Würfel auf den Stoff „Wasser“ und den blauen Stoff/Gegenstand auf den Zustand „fest“ ein!!! Lass den blauen Stoff/Gegenstand aufsteigen, schweben und sinken. Welche Eigenschaft musst du dafür verändern? **Kreuze** an.

Man muss ☐ die Masse (m) ☐ das Volumen (V) ☐ die Dichte (ρ) ☐ die Form verändern.

grauer Würfel

Zustand: gasförmig

$m = 0,0036 \text{ g}$

$V = 20 \text{ cm}^3$

$\rho = 0,0002 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$

blauer Stoff/Gegenstand

Zustand: fest

$m = 2 \text{ g}$

$V = 1 \text{ cm}^3$

$\rho = 2 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$

Formuliere mithilfe der Simulation Regeln für das Aufsteigen, Schweben und Sinken, indem du die Lücken vervollständigst.

Ist die _____ von dem blauen Gegenstand oder Stoff _____ als die _____ von dem grauen Würfel, **steigt** der blaue Gegenstand oder Stoff **auf**.

Ist die _____ von dem blauen Gegenstand oder Stoff _____ wie die _____ von dem grauen Würfel, **schwebt** der blaue Gegenstand oder Stoff.

Ist die _____ von dem blauen Gegenstand oder Stoff _____ als die _____ von dem grauen Würfel, **sinkt** der Gegenstand oder Stoff.

!!! Stelle den grauen Würfel auf den Stoff „Luft“ ein!!! **Überprüfe** mithilfe der Simulation, ob deine Regeln aus **b** auch in gasförmigen Stoffen gelten.

Wie kann man erklären, ob etwas aufsteigt, schwebt oder sinkt?

Erklären

1 Schwimmen, Sinken und Aufsteigen

a) Schwimmen ☒ oder sinken ☒ die Gegenstände und Stoffe in Wasser? **Kreuze** an und begründe. **Überprüfe** deine Vermutung, indem du den Kasten scannst.

Objekt	Begründung	Objekt	Begründung
Holzstamm $V = 1005 \text{ cm}^3$ $m = 678 \text{ g}$	☒	Eisenplatte $V = 200 \text{ cm}^3$ $m = 1574 \text{ g}$	☒
Zahnstocher $V = 1 \text{ cm}^3$ $m = 0,068 \text{ g}$	☒	Olivenöl $V = 0,05 \text{ cm}^3$ $m = 0,045 \text{ g}$	☒
Honig $V = 0,05 \text{ cm}^3$ $m = 0,065 \text{ g}$	☒		

b) Steigen die Gegenstände auf, wenn die Sperre entfernt wird? **Kreuze** ja ☒ oder nein ☒ an und begründe. **Überprüfe** deine Vermutung, indem du den Kasten scannst.

Objekt	Begründung
Sperre	☒
Gefäß mit Wasser	☒
Gefäß mit Luft	☒
Wachskerze	☒
Ballon mit Helium	☒
Ballon mit Kohlenstoffdioxid	☒

Sperre

Gefäß mit Wasser

Gefäß mit Luft

Wachskerze

$m = 4,5 \text{ g}$
 $V = 50 \text{ cm}^3$

Ballon mit Helium

$m = 1,18 \text{ g}$
 $V = 1000 \text{ cm}^3$

Ballon mit Kohlenstoffdioxid

$m = 2,98 \text{ g}$
 $V = 1000 \text{ cm}^3$



Wie kann man erklären, ob etwas aufsteigt, schwebt oder sinkt?

Vertiefen

④ Aufsteigen und Sinken in flüssigen Stoffen

a) Welche Stoffe steigen in Wasser ($\rho = 1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$) auf? **Kreise** sie ein.

Helium $0,00017 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$	Olivenöl $0,91 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$	Gold $19,3 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$	Milch $1,05 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$	Kohlenstoffdioxid $0,002 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
Luft $0,0012 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$	Kork $0,2 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$	Spülmittel $1,03 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$	Zucker $1,6 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$	Salz $2,16 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$

b) Unten ist ein „Dichteturm“. Dort sind Stoffe mit verschiedenen Dichten aufeinander geschichtet.

i) **Schreibe** auf, auf welcher Schicht die Gegenstände schwimmen, wenn sie in den Dichteturm fallen. **Überprüfe** deine Lösung, indem du den Kasten scannst.

ii) **Schreibe** auf, aus welchem Kunststoff die zwei Kugeln bestehen. **Nutze** die Tabelle auf der Website.

Dichte in $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$:			
Waschbenzin	0,79	i)	Wachskerze $0,95 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
Motoröl	0,84		Eiswürfel $0,91 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
Lampenöl	0,88	Schicht:	
Sonnenblumenöl	0,92		
Frostschutzmittel	1,01	ii)	
Spülmittel	1,03	Kunststoff:	
Zuckerlösung	1,10		
Honig	1,45		

⑤ Aufsteigen und Sinken in gasförmigen Stoffen

a) **Schaue** dir das Video zu der Aufgabe auf der Website an. Was passiert mit den Seifenblasen? **Notiere** deine Beobachtung. **Erkläre** sie mithilfe der Dichten von Kohlenstoffdioxid und der Seifenblasen.

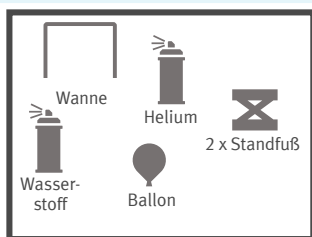
Tipp?

Beobachtung:

Erklärung:

b) **Plane** ein Experiment, in welchem du einen Ballon ähnlich wie in a) zum Schweben bringst. Unten findest du alle Materialien, die du verwenden darfst. **Skizziere** deinen Versuchsaufbau und **beschrifte** ihn. Hinweis: $\rho(\text{Wasserstoff}) = 0,00009 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$, $\rho(\text{Helium}) = 0,00017 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$, $\rho(\text{Luft}) = 0,0012 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$

Tipp?



Versuchsskizze:

B.3 Teilchenvorstellung

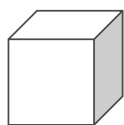


Wie kann man Dichteunterschiede von Stoffen erklären?

Erkunden

① Dichte Stoffe auf der Teilchenebene

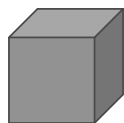
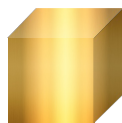
- a) Unten siehst du vier Stoffpaare. Bei jedem Paar hat der rechte Stoff eine größere Dichte als der linke Stoff. Woran liegt das? **Schaue** dir die Stoffe auf der Teilchenebene an, indem du die Paare scannst. **Schreibe** deine Vermutung auf, warum der rechte Stoff eine höhere Dichte hat.

gasförmiges Wasser
kleinere Dichteflüssiges Wasser
größere Dichte

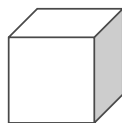
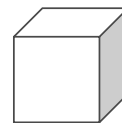
Vermutung: _____

warme Luft
kleinere Dichtekalte Luft
größere Dichte

Vermutung: _____

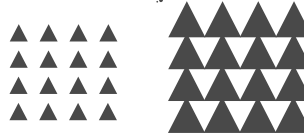
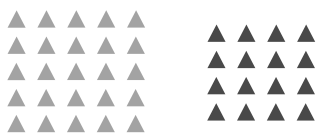
Blei
kleinere DichteGold
größere Dichte

Vermutung: _____

Neon
kleinere DichteArgon
größere Dichte

Vermutung: _____

- b) Unten siehst du vier Paare von Teilchendarstellungen. **Kreise** bei jedem Paar die Darstellung mit der größeren Dichte ein. **Begründe** deine Entscheidung. **Vergleiche** deine Antwort mit den Lösungen auf der Website.

hellgraue Teilchen (●) $m = 2 \text{ u}$ Einheit für
Teilchenmassedunkelgraue Teilchen (●) $m = 4 \text{ u}$ Begründung: _____
_____Begründung: _____
_____Begründung: _____
_____Begründung: _____

Wie kann man Dichteunterschiede von Stoffen erklären?

Vertiefen

③ Die Dichte auf der Teilchenebene vergleichen

Wo ist die größere Dichte dargestellt? **Kreise** die entsprechende Darstellung ein. **Begründe** deine Entscheidung indem du die gesamte Masse aller Teilchen in dem Würfel berechnest.

Rechnung:

Rechnung:

④ Die Dichte auf der Teilchenebene ohne Rechnen vergleichen

Häufig muss man gar nicht rechnen, wenn man die Dichte vergleichen möchte. Wie verändert sich bei den jeweiligen Beispielen die Dichte? **Beschreibe** es, ...

a) ... indem du nicht zutreffende Begriffe durchstreichst. **Überprüfe** deine Lösung mithilfe der Simulation.

Beispiel „Temperatur“

Beim Erhitzen vergrößert sich der Abstand von Teilchen. Deshalb nimmt die Dichte ab.

Beispiel „Metalle“

Die Teilchen von Wolfram und Barium haben den gleichen Abstand zueinander. Die Teilchen von Wolfram sind aber kleiner und schwerer. Deshalb ist die Dichte von Wolfram größer | kleiner als von Barium.

Rechnung:

Rechnung:

b) ... indem du nicht zutreffende Begriffe durchstreichst.

Tipp?

Beispiel „Legierungen“

Für Schmuck soll eine Legierung aus Gold und Silber hergestellt werden. Dabei wird die Hälfte der Goldteilchen durch leichtere Silberteilchen ausgetauscht. Deshalb nimmt die Dichte zu | ab.

Beispiel „Lösungen“

Löst man Zucker in Wasser, verteilen sich die Zuckerteilchen in den Lücken zwischen den Wasserteilchen. Deshalb nimmt die Dichte zu | ab.

12

© Institut für Didaktik der Chemie | Universität Münster | Pascal Meyer & Annette Marohn | v1.4



Wie kann man Dichteunterschiede von Stoffen erklären?

Erschließen

② Ideen, um Dichteunterschiede auf der Teilchenebene zu erklären

Unten siehst du 4 Ideen von Schülerinnen und Schülern (A bis D), um Dichteunterschiede von Stoffen auf der Teilchenebene zu erklären.

a) Lies dir die Ideen durch. Welche der Ideen hast du selbst in Aufgabe ① verwendet? **Kreise** sie ein.

Rechnung:

Rechnung:

b) Wo sehen die Schülerinnen und Schüler A bis D bei den Darstellungen ① und ② die größere Dichte? **Trage** entsprechend „rechts“, „links“ oder „gleich“ in die Tabelle ein.

Tipp?

Rechnung:

Rechnung:

Paar	richtige Antwort	Antwort Schüler A	Antwort Schülerin B	Antwort Schülerin C	Antwort Schüler D
1	rechts				
2	rechts				



11

© Institut für Didaktik der Chemie | Universität Münster | Pascal Meyer & Annette Marohn | v1.4
Merkmale ausfüllen!

B.4 Umrechnungsvorstellung



Wie kann man Masse in Volumen und Volumen in Masse umrechnen?

Erkunden

① Massen und Volumina in Rezepten

Du möchtest gerne Brownies backen. Im Internet findest du folgendes Rezept:

Brownies			
4,4 g	Vanillearoma	2	Eier
52 g	geschmolzene Schokolade	5 mL	Backpulver
90 g	Öl	80 mL	Zucker
		400 mL	Mehl



Komisch! Feststoffe sind in Milliliter und Flüssigkeiten in Gramm angegeben. In klassischen Rezepten ist das doch genau umgekehrt! **Schreibe** das Rezept in ein klassisches Rezept um. **Rechne** dazu Masse in Volumen und Volumen in Masse um, ...

a) ... indem du die Simulation nutzt. *Hinweis: 1 mL ist das Gleiche wie 1 cm³.*

Volumen in Masse umrechnen

Welche Masse haben 5 mL Backpulver?

$$V = 5 \text{ mL} \quad \rho = 0,7 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

$$m = \underline{\hspace{2cm}}$$

Welche Masse haben 80 mL Zucker?

$$V = 80 \text{ mL} \quad \rho = 1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

$$m = \underline{\hspace{2cm}}$$

Masse in Volumen umrechnen

Welches Volumen haben 4,4 g Vanillearoma?

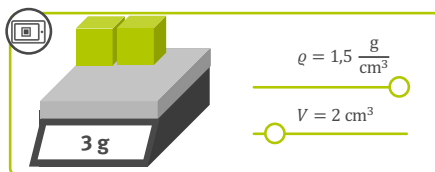
$$V = \underline{\hspace{2cm}} \quad \rho = 1,1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

$$m = 4,4 \text{ g}$$

Welches Volumen haben 52 g geschmolzene Schokolade?

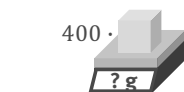
$$V = \underline{\hspace{2cm}} \quad \rho = 1,3 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

$$m = 52 \text{ g}$$



b) ... ohne die Simulation zu nutzen. **Schreibe** deine Überlegungen und/oder Rechnungen auf.

Welche Masse haben 400 mL Mehl?



$$V = 400 \text{ mL} \quad \rho = 0,5 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

$$m = \underline{\hspace{2cm}}$$

Welches Volumen haben 90 g Öl?



$$V = \underline{\hspace{2cm}} \quad \rho = 0,9 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

$$m = 90 \text{ g}$$

Volumen in Masse umrechnen

Masse in Volumen umrechnen

Wie kann man Masse in Volumen und Volumen in Masse umrechnen?

Vertiefen

③ Massen und Volumina umrechnen

Rechne Masse in Volumen und Volumen in Masse um. **Gib** deine Rechnung an.

Welche Masse haben 12 cm³ Eisen?

12 ·  $\rho = 7,8 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
 $V = 12 \text{ cm}^3 \cdot \rho = 7,8 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
 $m =$

Welches Volumen haben 15 cm³ Gold?

15 ·  $\rho = 19,3 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
 $V = 15 \text{ cm}^3 \cdot \rho = 19,3 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
 $m =$

Welches Volumen haben 40 g Neuschnee?

40 g ·  $\rho = 0,1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
 $V = \frac{m}{\rho} = \frac{40 \text{ g}}{0,1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}}$
 $V =$

Welches Volumen haben 720 g Beton?

720 g ·  $\rho = 2,4 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
 $V = \frac{m}{\rho} = \frac{720 \text{ g}}{2,4 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}}$
 $V =$

Welche Masse haben 200 cm³ Kork?

200 cm³ · $\rho = 0,2 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
 $V = 200 \text{ cm}^3 \cdot \rho = 0,2 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
 $m =$

Welche Masse haben 5 L Benzin?

5 L · $\rho = 0,7 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
 $V = 5 \text{ L} \cdot \rho = 0,7 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
 $m =$

Welches Volumen haben 500 g Glas?

500 g · $\rho = 2,5 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
 $V = \frac{m}{\rho} = \frac{500 \text{ g}}{2,5 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}}$
 $V =$

Welches Volumen haben 2,6 kg Luft?

2,6 kg · $\rho = 0,0013 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
 $V = \frac{m}{\rho} = \frac{2,6 \text{ kg}}{0,0013 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}}$
 $V =$

④ schwerer Diebstahl

Dieser Dieb muss bei der Größe der Würfel übertrieben haben. **Begründe.**

Hinweis: $V_{\text{Würfel}} = a^3 = a \cdot a \cdot a$

Ich habe 3 Goldwürfel in meinem Rucksack mitgenommen. Jeder Würfel war mindestens so groß!

$\rho(\text{Gold}) = 19,3 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
 $a = 15 \text{ cm}$

⑤ Lebensmittel umfüllen

Du möchtest gerne Haferflocken, Mehl und Zucker in schöne Einmachgläser umfüllen. Für welche Größe bei den Gläsern entscheidest du dich? **Begründe.**

$\rho = 0,35 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
 $m = 500 \text{ g}$
 $\rho = 0,5 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
 $m = 500 \text{ g}$
 $\rho = 1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
 $m = 500 \text{ g}$

Wie kann man Masse in Volumen und Volumen in Masse umrechnen?

Erschließen

② Gedankliches Wiegen

Verallgemeinere deine Erkenntnisse aus Aufgabe ①. **Schreibe** dazu die Wörter und Zahlen aus der Wortliste in die passenden Lücken.

Wortliste: Volumen, $\frac{m}{V}$, Volumen, Masse, Umrechnungsgröße, multiplizieren, dividieren, $V \cdot \rho$, ρ , ρ , 90, 90, 400, 200, 100, 0,9, 0,9, 0,5, 0,5, ,

Volumen in Masse umrechnen

Welche Masse haben 400 mL Mehl?

1 ·  $\rho = 0,5 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
 $V = 400 \text{ mL} \cdot \rho = 0,5 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
 $m =$

Masse in Volumen umrechnen

Welches Volumen haben 90 g Öl?

1 ·  $\rho = 0,9 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
 $V = \frac{m}{\rho} = \frac{90 \text{ g}}{0,9 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}}$
 $V =$

Ich wiege gedanklich Kubikzentimeter (-Würfel).

Die Frage lautet dann: Wie viel wiegen Kubikzentimeter (-Würfel) Mehl?

Für jeden Würfel kommen $\frac{m}{V}$ g hinzu. Deshalb rechne ich $\frac{m}{V}$ mit der Dichte

Ich muss also das $\frac{m}{V}$ mit der Dichte ρ durch die Dichte ρ . Deshalb lautet die Formel:

$m =$

Ich wiege gedanklich Kubikzentimeter (-Würfel).

Die Frage lautet dann: Wie viele Kubikzentimeter (-Würfel) Öl wiegen $\frac{m}{V}$ g?

Also muss ich mir überlegen, wie viel Mal die $\frac{m}{V}$ in die $\frac{m}{V}$ passt.

Dazu rechne ich $\frac{m}{V}$ mit der Dichte ρ . Ich muss also die $\frac{m}{V}$ durch die Dichte ρ . Deshalb lautet die Formel:

$V =$

Die Dichte ist eine $\frac{m}{V}$. Mit ihrer Hilfe kann man die Masse in das $\frac{m}{V}$ oder das Volumen in die $\frac{m}{V}$ umrechnen.

B.5 Merktzettel

Merktzettel

Wie kann man die Masse von Stoffen verhältnismäßig vergleichen?

Antwort: Mithilfe der **Würfelvorstellung** der Dichte!



Würfelvorstellung

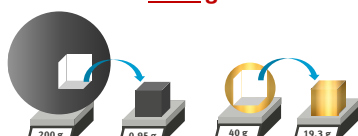
Die Dichte ist eine Stoffeigenschaft. Sie gibt an, wie viel ein Kubikzentimeter(-Würfel) eines Stoffes wiegt.

Bestimmung und Formel der Dichte!

Um die Dichte zu bestimmen, muss man die _____ eines Stoffes durch die Anzahl der _____ (-Würfel) teilen. Deshalb gilt:

$$\text{Dichte} = \frac{\text{Masse}}{\text{Volumen}} \quad \Leftrightarrow \quad \rho = \frac{m}{V}$$

Schwer ist nicht gleich dicht!



So schreibt und liest man die Dichte!

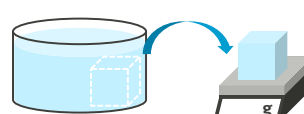
Wir schreiben: ρ ist der griechische Buchstabe „Rho“

$\rho(\text{Wasser}) = 1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$

pro _____ (-Würfel)

Wir sagen: Die Dichte von Wasser beträgt 1 _____ pro _____ (-Würfel).

Wir beobachten: Ein Kubikzentimeter(-Würfel) Wasser wiegt _____ Gramm.



v1.4

Merktzettel

Wie kann man erklären, ob etwas aufsteigt, schwebt oder sinkt?

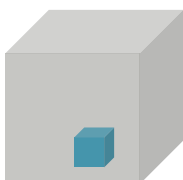
Antwort: Mithilfe der **Auftriebsvorstellung** der Dichte!



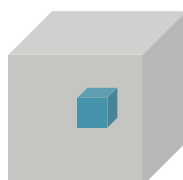
Auftriebsvorstellung

Die Dichte ist ein Maß dafür, ob etwas aufsteigt, schwebt oder sinkt.

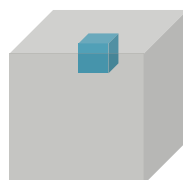
Regeln zum Aufsteigen, Schweben und Sinken



Ein Stoff oder Gegenstand _____, wenn seine Dichte _____ ist, als die Dichte von dem umliegenden Stoff.



Ein Stoff oder Gegenstand _____, wenn seine Dichte _____ ist, wie die Dichte von dem umliegenden Stoff.



Ein Stoff oder Gegenstand _____, wenn seine Dichte _____ ist, als die Dichte von dem umliegenden Stoff.

v1.4

Merkzettel

Wie kann man Dichteunterschiede von Stoffen erklären?

Antwort: Mithilfe der **Teilchenvorstellung** der Dichte!

Teilchenvorstellung



Die Dichte ist ein Maß für die gesamte Masse aller Teilchen in einem Würfel

So kann man sich das vorstellen!

Berechne die gesamte Masse aller Teilchen in einem Würfel wie die Schülerin B aus Aufgabe 2a):

$m = 2 \text{ u}$ $m = 6 \text{ u}$

$m =$ $m =$

So geht man vor!

Wie lautet die richtige Reihenfolge der Schritte zur Anwendung der Idee? **Numeriere** von 1 bis 4:

- ☐ **Vergleiche** beide Dichten Die Dichte ist bei kleiner als bei
- ☐ **Rechne** die Masse aller Teilchen in dem Ausschnitt zusammen $m = 4 \cdot 2 \text{ u} = 8 \text{ u}$ $m = 9 \cdot 6 \text{ u} = 54 \text{ u}$
- ☐ **Vergleiche** beide Massen 8 u ist kleiner als 54 u
- ☐ **Wähle** einen gleich großen Ausschnitt

v1.4

Merkzettel

Wie kann man Masse in Volumen und Volumen in Masse umrechnen?

Antwort: Mithilfe der **Umrechnungsvorstellung** der Dichte!

Umrechnungsvorstellung



Die Dichte ist eine Umrechnungsgröße.

Mit ihrer Hilfe kann man die Masse in das Volumen oder das Volumen in die Masse umrechnen.

So rechnet man um!

Man wiegt gedanklich Kubikzentimeter (-Würfel)!

Volumen in Masse

Welche Masse haben 400 mL Mehl?



$$V = 400 \text{ mL} \quad \rho = 0,5 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

$$m =$$

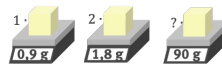
Wie viel wiegen Kubikzentimeter (-Würfel) Mehl?

$$\boxed{} \boxed{} = \boxed{}$$

$$m = \boxed{}$$

Masse in Volumen

Welches Volumen haben 90g Öl?



$$V = \quad \rho = 0,9 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

$$m = 90 \text{ g}$$

Wie viele Kubikzentimeter (-Würfel) Öl wiegen g?

$$\boxed{} \boxed{} = \boxed{}$$

$$V = \boxed{}$$

v1.4

B.6 Vernetzung

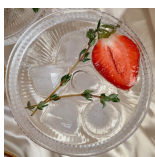
Vernetzen

① Zurück zum Jahrmarkt

Lies dir die Fragen aus Aufgabe ① in der Phase „Fragen?“ durch. Welche der Fragen kannst du beantworten? Welche nicht? **Nutze** dazu deine Merktzettel.
Tausche dich mit deiner Partnerin/deinem Partner aus.

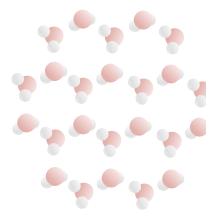
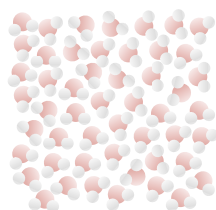
② Die Dichteanomalie von Wasser

Festes Wasser (Eis) schwimmt im flüssigen Wasser.
Das kennst du zum Beispiel von Eiskwürfeln oder Eisbergen.



a) Unten siehst du Darstellungen von Wasser auf der Teilchenebene. **Ordne** den Darstellungen die Aggregatzustände *fest*, *flüssig* und *gasförmig* zu. **Begründe** deine Entscheidung.

Tipp?



Aggregatzustand:

Begründung:



b) Die unterschiedlichen Dichten von Wasser bei den Aggregatzuständen ist sehr ungewöhnlich. Deshalb spricht man auch von der „Dichteanomalie von Wasser“. **Schaue** dir die Tabelle zur Aufgabe auf der Website an. **Vergleiche** die Dichten der Stoffe mit den Dichten von Wasser. **Beschreibe** die Dichteanomalie von Wasser, indem du den Lückentext vervollständigst.

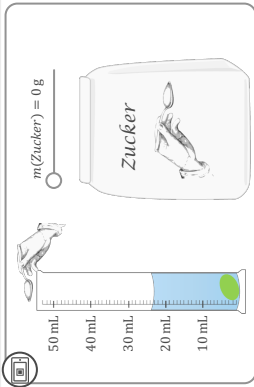
Tipp?

Die Dichte von Stoffen ist normalerweise im _____ Zustand größer als im _____ Zustand. Bei Wasser ist das umgekehrt. Dort ist die Dichte im _____ Zustand kleiner als im _____ Zustand. Das kann man daran erkennen, dass _____ Wasser im _____ Wasser schwimmt. Auf der Teilchenebene kann man das daran erkennen, dass sich die Teilchen in einer sechseckigen Struktur anordnen. Deshalb ist _____ und damit auch die Dichte im _____ Zustand kleiner als im _____ Zustand.

Vernetzen

③ Die magische Traube

Unten siehst du eine Simulation von einem Experiment. Dort hat man einen Messzylinder mit 20 mL Wasser befüllt. Dann hat man eine Weintraube in den Messzylinder gegeben. Du kannst Zucker in den Messzylinder geben, indem du den Schieberegler bewegst.



- a) Gib das Volumen der Traube an. $V(\text{Traube}) =$ _____
- b) Scanne die Simulation. Stelle einer Zuckerlösung her, indem du in 1 g Schritten Zucker in den Messzylinder gibst. **Vervollständige** die Tabelle. Was passiert mit der Weintraube? **Notiere** deine Beobachtung.

$m(\text{Zucker})$	$m(\text{Lösung})$ ohne Traube	$V(\text{Lösung})$ ohne Traube	$m(\text{Zucker})$	$m(\text{Lösung})$ ohne Traube	$V(\text{Lösung})$ ohne Traube
0 g	20 g	20 mL	6 g		
1 g			7 g		
2 g			8 g		
3 g			9 g		
4 g			10 g		
5 g			11 g		

Beobachtung: _____

- c) **Beschreibe** mithilfe der Tabelle, wie sich die Dichte der Lösung ändert. **Erkläre** anschließend deine Beobachtung zu der Weintraube.

Vernetzen

- c) Mit Wasser gefüllte Flaschen sollte man nicht einfrieren. **Erkläre** dies mithilfe der Dichteanomalie von Wasser.

- d) Welches Volumen muss eine schwimmende Eisscholle haben, um einen 80 kg schweren Menschen zu tragen?
Hinweis: $\rho(\text{Eis}) = 0,9 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$; $\rho(\text{Wasser}) = 1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$. Überlege dir zunächst, welche Masse ein Kubikzentimeter (-Würfel) Eis tragen kann, sodass er gerade noch schwimmt.

Notizen:

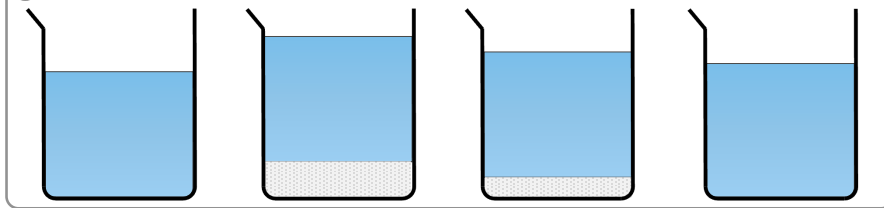
Antwort: _____

Vernetzen

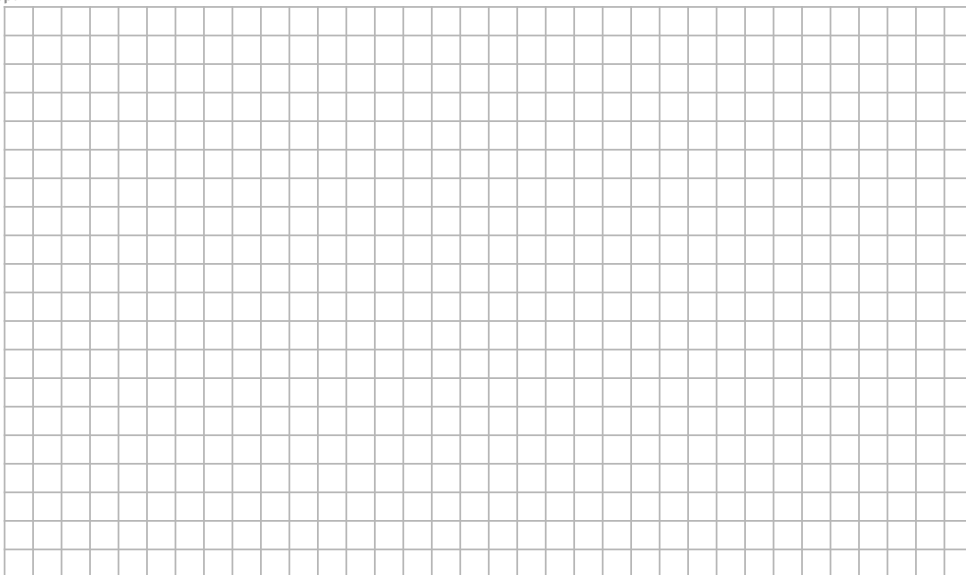


- d) Unten siehst du das Lösen von Zucker in vier Schritten. **Schaue** dir das Lösen von Zucker auf der Teilchenebene an, indem du den Kasten scannst. **Erkläre**, warum die Dichte der Zuckerlösung anders als die Dichte von Wasser ist.
Tipp?

Hinweis: $m(\text{Wasserteilchen}) = 18 \text{ u}$, $m(\text{Zuckerteilchen}) = 342 \text{ u}$



- e) **Bringe** die Weintraube in der Simulation zum Schweben. **Berechne** anschließend die Masse der Weintraube.
Tipp?



C Codierleitfäden

Hinweis: Anpassungen der Codierleitfäden, die auf Basis der Diskussionen im Rahmen des konsensuellen Codierens vorgenommen wurden, sind hellgrau hervorgehoben.

C.1 Herleitung der Grundvorstellungen zur Dichte

Codierleitfaden zur Herleitung der Grundvorstellungen zur Dichte

Codesystem

1 Aussagen/Erläuterungen	218
1.1 Verhältnis zwischen Masse und Volumen	0
1.1.1 Stoffeigenschaft	84
1.1.2 Dichtebestimmung	8
1.1.3 Dichte-Masse-Beziehung	21
1.1.4 Dichte-Volumen-Beziehung	12
1.2 Auftrieb	0
1.2.1 Auftrieb in Gasen	19
1.2.2 Auftrieb in Flüssigkeiten	49
1.3 Zusammenhang zwischen Dichte und Teilchenebene	5
1.3.1 Dichte-Teilchenmasse-Beziehung	10
1.3.2 Dichte-Teilchenmasse-Beziehung	4
1.3.3 Dichte-Anzahl an Teilchen pro Volumen-Beziehung	1
1.4 Umrechnung $m \leftrightarrow V$	0
1.4.1 $m \rightarrow V$	4
1.4.2 $V \rightarrow m$	6
1.5 Beziehungen zu weiteren Größen	0
1.5.1 Dichte-Konzentration-Beziehung	6
1.5.2 Dichte-optische Dichte-Beziehung	1
1.5.3 Dichte-molare Größen-Beziehung	1
1.5.4 Dichte-Temperatur-Beziehung	1
2 Aufgabe	151
2.1 Verhältnis zwischen Masse und Volumen	0
2.1.1 Stoffeigenschaft	20
2.1.2 Dichtebestimmung	42
2.1.3 Dichte-Masse-Beziehung	10
2.1.4 Dichte-Volumen-Beziehung	5
2.2 Auftrieb	0

2.2.1 Auftrieb in Gasen	14
2.2.2 Auftrieb in Flüssigkeiten	28
2.3 Zusammenhang zwischen Dichte und Teilchenebene	12
2.4 Umrechnung $m < \rightarrow V$	0
2.4.1 $m \rightarrow V$	8
2.4.2 $V \rightarrow m$	21
2.5 Beziehungen zu weiteren Größen	0
2.5.1 Dichte-Konzentration-Beziehung	6
2.5.2 Dichte-molare Größen-Beziehung	5
2.5.3 Dichte-Temperatur-Beziehung	4
3 Darstellung	121
3.1 Graph	6
3.2 tabellarisch als Steckbrief/Stoffliste	79
3.3 Experimente/Phänomene	0
3.3.1 Verhältnis zwischen Masse und Volumen	0
3.3.1.1 Dichtebestimmung	8
3.3.1.2 Dichte-Masse-Beziehung	4
3.3.1.3 Dichte-Volumen-Beziehung	3
3.3.2 Auftrieb	0
3.3.2.1 Auftrieb in Gasen	6
3.3.2.2 Auftrieb in Flüssigkeiten	15

1 Aussagen/Erläuterungen

1.1 Verhältnis zwischen Masse und Volumen

1.1.1 Stoffeigenschaft

Definition: Die Aussage/Erläuterung stellt die Dichte als eine charakteristische Eigenschaft von Stoffen dar.

Ankerbeispiele:

- "Die Eigenschaft, in der sich Aluminium und Blei unterscheiden, ist ihre Dichte ρ (sprich „rho“). Die Dichte ist der Quotient aus der Masse und dem Volumen eines Stoffes. Sie ist eine messbare, charakteristische Stoffeigenschaft. Die Einheit der Dichte ist Gramm pro Kubikzentimeter (g/cm^3).“ (Schulbücher|PRISMA Chemie 1.2: S. 42)
- "Schwefelsäure ist eine farblose, ölige Flüssigkeit mit hoher Dichte ($\rho = 1,83 \text{ g}/\text{cm}^3$) und hoher Siedetemperatur ($t_b = 380^\circ\text{C}$). Konzentrierte Schwefelsäure hat einen Massenanteil von 98 % Schwefelsäure." (Schulbücher|Chemie2000+ S.192)
- "Der Quotient aus Masse und Volumen ist eine charakteristische Stoffeigenschaft und wird Dichte genannt. Die Dichte wird meist in g/cm^3 angegeben." (Schulbücher|Elemente Chemie 1: S. 35)

Kodierregeln: Die Kategorie "Stoffeigenschaft" wird codiert, wenn...

- ... die Dichte als eine charakteristische Stoffeigenschaft beschrieben wird.
- ... Stoffe mithilfe der Dichte (und ggf. weiteren Stoffeigenschaften) charakterisiert werden.
- ... die Dichte als Quotient aus Masse und Volumen definiert wird
- ... anhand der Dichte eine Einteilung in "Leicht-" und "Schwermetalle" vorgenommen wird

Die Kategorie wird nicht codiert, wenn die Dichte zwar als Eigenschaft bezeichnet oder zur Charakterisierung eines Stoffes verwendet wird, aber der Wert der Dichte genutzt wird, um den Auftrieb in Fluiden zu erklären, z.B.:

- "Wasserstoff hat von allen Stoffen die geringste Dichte. Wegen seines großen Auftriebs in Luft wurden früher Ballons und Zeppeline mit Wasserstoff gefüllt. Da das Gas aber hochentzündlich ist, verwendet man heute das unbrennbare, teurere Helium als Füllgas." (Schulbücher > Chemie2000+ S. 79)

1.1.2 Dichtebestimmung

Definition: Die Aussage/Erläuterung bezieht sich auf Bestimmung der Dichte von Stoffen und Objekten

Ankerbeispiele:

- "Bestimmung der Dichte von Feststoffen und Flüssigkeiten. Wenn Masse und Volumen eines Körpers bekannt sind, lässt sich die Dichte des Stoffes leicht berechnen. Die Masse wird mithilfe der Waage ermittelt, das Volumen eines Körpers kann z.B. durch Wasserverdrängung bestimmt werden [B4]. Zur Bestimmung der Dichte flüssiger Stoffe misst man mit einem Messzylinder oder einer Pipette das Volumen einer Flüssigkeitsportion und bestimmt durch Wägung deren Masse." (Schulbücher|Elemente Chemie 1: S. 34)
- "Die Dichte kann nach der Bestimmung der Masse und des Volumens einer Stoffportion berechnet werden." (Schulbücher|PRISMA Chemie 1.2: S. 65)

Bodybuilder sind trainiert, dennoch haben sie bei gleicher Größe häufig ein ähnliches Gewicht wie Sportmuffel. Der Unterschied liegt in der Körperfülle. Diese ist beim Bodybuilder geringer, weil Muskelgewebe bei gleicher Masse ein geringeres Volumen als Fettgewebe einnimmt (Abb. 1). Man sagt, Muskeln haben eine größere Dichte als Fett." (Schulbücher\Chemie heute - Si: S. 31)

- "Gase haben eine so geringe Dichte, dass man die Einheit g/l verwendet. Das betrachtete Volumen ist hier tausendmal größer als das bei Feststoffen und Flüssigkeiten." (Schulbücher\Chemie heute - Si: S. 31)

Kodierregeln:

Die Kategorie "Dichte-Volumen-Beziehung" wird codiert, wenn...

- ... anhand der Dichte Aussagen über das Volumen getroffen werden
- ... anhand des Volumens Aussagen über die Dichte getroffen werden

Die Kategorie wird auch codiert, wenn Aussagen über die Dichte anhand von Temperatur- oder Druckänderungen getroffen werden und die eigentliche Volumenänderung nicht explizit genannt wird, z.B.:

- "Die Dichte von Stoffen wird in der Regel bei 20 °C angegeben. Beim Abkühlen erhöht sich die Dichte von Flüssigkeiten, bis die Erstarrungstemperatur erreicht ist. Wasser allerdings erreicht seine größte Dichte nicht bei 0 °C, sondern bei 4 °C. Sie beträgt bei dieser Temperatur 1,0 g/cm³ (V4)" (Schulbücher\PRISMA Chemie 1.2: S. 52 - 52)

1.2 Auftrieb

1.2.1 Auftrieb in Gasen

Definition: Die Aussage/Erläuterung bezieht sich auf den Zusammenhang zwischen der Dichte eines Stoffes/eines Objekts und dem Auf- oder Absteigen in gasförmigen Stoffen.

Ankerbeispiele:

- "Die Dichte des Kohlenstoffdioxids ist etwa 1,5-mal so groß wie die der Luft. Kohlenstoffdioxid lässt sich deshalb umgeben wie eine Flüssigkeit und sammelt sich am Boden eines Raumes oder Gefäßes. Es ist nicht brennbar. Aus der großen Dichte und seiner Nichtbrennbarkeit ergibt sich seine Verwendung als Feuerlöschmittel [V4]" (Schulbücher\Elemente Chemie 1: S. 98)
- "Helium hat eine sehr viel geringere Dichte als Luft und wird deshalb zur Füllung von Ballonen und Luftschiffen verwendet" (t > B 3)." (Schulbücher\PRISMA Chemie 1.2: S. 190)

Kodierregeln:

Die Kategorie "Auftrieb in Gasen" wird codiert, wenn...

Kodierregeln: Die Kategorie "Dichtebestimmung" wird codiert, wenn...

- ... die experimentelle Bestimmung der Dichte (z.B. mittels Waage und Volumenverdrängung) beschrieben wird
- ... die Bestimmung der Dichte mittels Aräometer beschrieben wird
- ... die Dichte berechnet wird

1.1.3 Dichte-Masse-Beziehung

Definition: Die Aussage/Erläuterung bezieht sich auf den proportionalen Zusammenhang zwischen Dichte und Masse

Ankerbeispiele:

- "Ein Würfel mit einer Kantenlänge von 1 cm hat ein Volumen von 1 cm³. Bestimmt man die Massen verschiedener Kubikzentimeter-Würfel, stellt man Unterschiede fest (V 1). Ein Bleiwürfel ist schwerer als ein Aluminiumwürfel. Beide haben unterschiedlich große Massen, aber das gleiche Volumen. Die Eigenschaft, in der sich Aluminium und Blei unterscheiden, ist ihre Dichte ρ (sprich „rho")" (Schulbücher\PRISMA Chemie 1.2: S. 42)
- "Wasserstoff ist das „leichteste" Gas, d. h., es besitzt mit 0,083 g/l die geringste Dichte aller Gase" (Schulbücher\PRISMA Chemie 1.2: S. 78)

Kodierregeln: Die Kategorie "Dichte-Masse-Beziehung" wird codiert, wenn...

- ... anhand der Dichte Aussagen über die Masse getroffen werden
- ... anhand der Masse Aussagen über die Dichte getroffen werden

Diese Kategorie wird ebenfalls codiert, wenn mithilfe der Dichte implizit eine Aussage über die Masse gemacht wird, z.B.:

- "Im Flugzeugbau wird wegen seiner geringen Dichte und großen Zugfestigkeit Duraluminium eingesetzt." (Schulbücher > Fokus Chemie - Gymnasium - Gesamtband Sekundarstufe I, S. 159)

Hier wird implizit eine Aussage über die Masse gemacht, da eine geringe Dichte wichtig für die Gewichtsreduktion im Flugzeugbau ist.

1.1.4 Dichte-Volumen-Beziehung

Definition: Die Aussage/Erläuterung bezieht sich auf den antproportionalen Zusammenhang zwischen Dichte und Volumen

Ankerbeispiele:

- "Ein geringes Gewicht wird oft mit körperlicher Fitness gleichgesetzt. Doch dies allein ist nicht entscheidend, denn nur hieran lässt sich die Fitness nicht festmachen:

Kodierregeln: Die Kategorie "Zusammenhang zwischen Dichte und Teilchenebene" wird codiert, wenn...

- ...Zusammenhänge zwischen der Dichte und der Teilchenebene angedeutet, aber nicht explizit erläutert werden

1.3.1 Dichte-Teilchennähe-Beziehung

Definition: Die Aussage/Erläuterung bezieht sich auf Zusammenhänge zwischen der Dichte und der Nähe der Teilchen.

Ankerbeispiele:

- "Ein weiterer Anwendungsbereich ist der Einsatz des Kohlenstoffdioxids in Hochdruckextraktionsverfahren als schonendes Lösungsmittel für empfindliche Naturstoffe (Exkurs). Dabei liegt bei sehr hohem Druck Kohlenstoffdioxid als Gas mit hoher Dichte vor, in dem ähnlich geringe Abstände zwischen den Molekülen vorliegen wie bei herkömmlichen Lösungsmitteln." (Schulbücher\Elemente Chemie 1: S. 304)

Kodierregeln:

Die Kategorie "Zusammenhang zwischen Dichte und Teilchenebene" wird codiert, wenn...

- ... anhand der Dichte Aussagen über die Nähe/den Abstand der Teilchen getroffen werden
- ... anhand der Nähe/dem Abstand der Teilchen Aussagen über die Dichte getroffen werden

Die Kategorie wird ebenfalls codiert, wenn anhand der Nähe der Teilchen zunächst Aussagen über das Volumen getroffen und diese dann auf die Dichte bezogen werden, wie z.B.:

- "Beim Lösen des Salzes diffundieren die Wasser-Moleküle zwischen die Ionen des Ionengitters und ordnen sich eng um diese herum an. Um die Ionen bilden sich sogenannte Hydrathüllen (vgl. dazu die Animation unter Chemie 2000+ Online). Die Wasser-Moleküle in diesen Hydrathüllen liegen enger aneinander als im reinen Wasser, wodurch das Volumen beim Lösen etwas abnimmt. Salzwasser hat also eine größere Dichte als destilliertes Wasser." (Schulbücher\Chemie2000+-S. 157)

1.3.2 Dichte-Teilchenmasse-Beziehung

Definition: Die Aussage/Erläuterung bezieht sich auf Zusammenhänge zwischen der Dichte und der Teilchenmasse.

Ankerbeispiele:

- "Ein Liter Helium enthält also gleich viele Teilchen wie ein Liter Xenon. Da aber die Atome des Xenons eine größere Masse besitzen als die Atome des Heliums, ist die Gesamtmasse eines Liters Xenon größer als die Gesamtmasse eines Liters Helium. Xenon besitzt damit eine größere Dichte. Alle Edelgase bestehen aus einzelnen

7

- ... der Zusammenhang zwischen der Dichte eines Stoffes/eines Objekts und dem Auf- oder Absteigen in gasförmigen Stoffen beschrieben wird.

1.2.2 Auftrieb in Flüssigkeiten

Definition: Die Aussage/Erläuterung bezieht sich auf den Zusammenhang zwischen der Dichte eines Stoffes/eines Objekts und dem Auf- oder Absteigen in flüssigen Stoffen.

Ankerbeispiele:

- "Brennendes heißes, flüssiges Fett oder Wachs dürfen auf keinen Fall mit Wasser in Berührung kommen. Da Wasser eine größere Dichte besitzt als diese Flüssigkeiten, geht es darin unter und verdampft dabei schlagartig." (Schulbücher\Elemente Chemie 1: S. 105)
- "Feststoffe verschiedener Dichten können mithilfe einer Flüssigkeit getrennt werden, deren Dichte so gewählt wird, dass der eine Stoff nach oben steigt, während der andere zu Boden sinkt (Schwimmtrennung [V1]). Zwei ineinander nicht lösliche Flüssigkeiten lassen sich mit dem Scheidetrichter dadurch trennen, dass man die Flüssigkeit mit der größeren Dichte unten ablässt" (Schulbücher\Elemente Chemie 1: S.55)

Kodierregeln:

Die Kategorie "Auftrieb in Flüssigkeiten" wird codiert, wenn...

- ... der Zusammenhang zwischen der Dichte eines Stoffes/eines Objekts und dem Auf- oder Absteigen in flüssigen Stoffen beschrieben wird.
- ... die Dichte im Zusammenhang mit dem Trennverfahren "Zentrifugieren" genannt wird.

1.3 Zusammenhang zwischen Dichte und Teilchenebene

Definition: Die Aussage/Erläuterung bezieht sich auf den Zusammenhang zwischen der Dichte und der Teilchenebene.

Ankerbeispiele:

- "Mit Wasserstoffrücken zwischen Wassermolekülen lassen sich die besonderen Eigenschaften des Wassers wie die hohe Siedetemperatur, die Dichteanomalie und die Oberflächenspannung erklären." (Schulbücher\Elemente Chemie 1: 130 - 130)
- "Einzelne Atome haben andere Eigenschaften als die Stoffe, die aus ihnen aufgebaut sind. Erst das Zusammenwirken einer großen Anzahl dieser Atome ergibt die Eigenschaften, die wir an Stoffen beobachten, wie Farbe, Glanz, Aggregatzustand, Dichte und Siedetemperatur." (Schulbücher\Chemie2000+- 29 - 29)

6

Die Kategorie "m -> V" wird codiert, wenn...

- ... die Umrechnung einer Masse in ein Volumen mithilfe der Dichte beschrieben wird.

1.4.2 V->m

Definition: Die Aussage/Erläuterung beschreibt die Umrechnung eines Volumens in eine Masse mithilfe der Dichte.

Ankerbeispiele:

- "Nehmen wir an, ein Pkw verbraucht pro Jahr 1500 Liter Benzin. Bei einer Dichte von etwa 0,8 g/cm³ entspricht das einer Masse von 1200 kg. Kraftstoff „verschwinden“ im Tank des Pkw. Von dieser Masse werden mehr als 3000 m³ Sauerstoff zur Verbrennung aufgebraucht." (Schulbücher\Fokus Chemie - Gymnasium - Gesamtband Sekundarstufe I: S. 88)

Kodierregeln:

Die Kategorie "V -> m" wird codiert, wenn...

- ... die Umrechnung eines Volumens in eine Masse mithilfe der Dichte beschrieben wird.

1.5 Beziehungen zu weiteren Größen

Definition: Die Aussage/Erläuterung bezieht sich auf den Zusammenhang zwischen der Dichte und weiteren weiteren Größen.

Ankerbeispiele:

- "Während des Entladens und Ladens verändert sich die Konzentration und somit die Dichte der Schwefelsäure im Bleiakkumulator. Über eine Dichtebestimmung kann daher der Ladezustand sehr einfach bestimmt werden." (Schulbücher\Fokus Chemie - Gymnasium - Gesamtband Sekundarstufe I: S. 375)

Kodierregeln:

Die Kategorie "Beziehungen zu weiteren Größen" wird codiert, wenn...

- ... der Zusammenhang zwischen der Dichte und weiteren Größen beschrieben wird.
- ... in Berechnungen die Dichte mit weiteren Größen verknüpft wird.

Zu jeder weiteren Größe wird ein eigener Subcode erstellt, wie z.B. "Dichte-Konzentration-Beziehung"

Die Kategorie wird nicht codiert, wenn der Zusammenhang zwischen der Dichte und dem Volumen oder der Masse beschrieben wird. Stattdessen erfolgt die Codierung mit den Kategorien:

- "Dichte-Masse-Beziehung"
- "Dichte-Volumen-Beziehung"

9

Atomen. Deshalb ist die Dichte eines Edelgases auch proportional zur Atommasse." (Schulbücher\Chemie2000+: S. 117)

Kodierregeln:

Die Kategorie "Dichte-Teilchenmasse-Beziehung" wird codiert, wenn...

- ... anhand der Dichte Aussagen über die Teilchenmasse getroffen werden
- ... anhand der Teilchenmasse Aussagen über die Dichte getroffen werden

1.3 Dichte-Anzahl an Teilchen pro Volumen-Beziehung

Definition: Die Aussage/Erläuterung bezieht sich auf Zusammenhänge zwischen der Dichte und der Anzahl an Teilchen pro Volumen.

Ankerbeispiele:

- "Ein Liter Kohlenstoffdioxid wiegt bei Raumtemperatur immerhin etwa 1,83 g, ein Liter Helium bringt dagegen nur 0,17 g auf die Waage. Woher kommt der Unterschied in den Massen? Dies kann zwei Gründe haben: Entweder unterscheiden sich die Stoffmengen in den gleichen Gasvolumina oder die Bestandteile der Gase haben eine unterschiedliche Masse (Schulbücher\Chemie heute - St: S. 184)

Kodierregeln:

Die Kategorie "Dichte-Anzahl an Teilchen pro Volumen-Beziehung" wird codiert, wenn...

- ... anhand der Dichte Aussagen über Anzahl an Teilchen pro Volumen getroffen werden
- ... anhand der Anzahl an Teilchen pro Volumen Aussagen über die Dichte getroffen werden

1.4 Umrechnung m<->V

1.4.1 m->V

Definition: Die Aussage/Erläuterung beschreibt die Umrechnung einer Masse in ein Volumen mithilfe der Dichte.

Ankerbeispiele:

- "Dichten verschiedener Stoffe sind in Tabellenwerken (BS) zusammengefasst. Über diese Werte kann man auch das Volumen einer Stoffportion bei bekannter Masse bzw. die Masse bei bekanntem Volumen berechnen. Dazu muss man die oben angegebene Gleichung umformen: $\text{Volumen} = \text{Masse} \text{ oder } \text{Masse} = \text{Dichte} \cdot \text{Volumen}$ " (Schulbücher\Chemie2000+: S. 21)

Kodierregeln:

8

1.5.1 Dichte-Konzentration-Beziehung

1.5.2 Dichte-optische Dichte-Beziehung

1.5.3 Dichte-molare Größen-Beziehung

1.5.4 Dichte-Temperatur-Beziehung

2 Aufgabe

2.1 Verhältnis zwischen Masse und Volumen

2.1.1 Stoffeigenschaft

Definition: Die Aufgabe hebt die Dichte als eine charakteristische Eigenschaft von Stoffen hervor.

Ankerbeispiele:

- "Ein Metallstab hat das Volumen 3 cm³ und die Masse 8,1 g. Berechne, um welches Metall es sich handelt." (Schulbücher\Chemie heute - Si: S. 31)
- "Ein 2 cm breites, goldfarbenes Armband ist 22 cm lang, 2 mm dick und wiegt 118,3 g. Ermittle, ob es aus reinem Gold besteht." (Schulbücher\Chemie heute - Si: S. 38)
- "Notiere in Steckbriefen jeweils die Eigenschaften Farbe, Glanz, Aggregatzustand bei Zimmertemperatur, Verformbarkeit, Dichte, elektrische Leitfähigkeit, Verhalten gegenüber Magneten, Härte und Wärmeleitfähigkeit der untersuchten Metalle. Entwickle einen allgemeinen Steckbrief für Metalle." (Schulbücher\Fokus Chemie - Gymnasium - Gesamtband Sekundarstufe I: S. 151)
- "Ordne die Metalle Blei, Titan, Magnesium und Platin den Leicht- bzw. Schwermetallen zu." (Schulbücher\PRISMA Chemie 1,2: S. 150)

10

Kodierregeln: Die Kategorie "Stoffeigenschaft" wird codiert, wenn...

- ... anhand der Dichte ein Stoff bestimmt werden soll.
- ... mithilfe der Dichte die Reinheit eines Stoffes überprüft werden soll.
- ... Steckbriefe erstellt werden sollen.
- ... anhand der Dichte eine Einteilung in "Leicht-" und "Schwermetalle" vorgenommen werden soll

2.1.2 Dichtebestimmung

Definition: Die Aufgabe erfordert die Bestimmung der Dichte von Stoffen und Objekten

Ankerbeispiele:

- "Bestimme durch Abwiegen die Masse eines Aluminiumstückes. Ermittle das Volumen [84]. Berechne die Dichte des Aluminiums." (Schulbücher\Elemente Chemie 1: S. 35)
- "Erläutere, wie man die Dichte eines Metallstabes bestimmt. Nutze dazu die Informationen der Abb. 2." (Schulbücher\Chemie heute - Si: S. 31)

Kodierregeln: Die Kategorie "Dichtebestimmung" wird codiert, wenn...

- ... die experimentelle Bestimmung der Dichte (z.B. mittels Waage und Volumenverdrängung) oder deren Beschreibung gefordert wird.
- ... die Bestimmung der Dichte mittels Aräometer gefordert wird.
- ... die Dichte berechnet werden soll.

2.1.3 Dichte-Masse-Beziehung

Definition: Die Aufgabe bezieht sich auf den proportionalen Zusammenhang zwischen Dichte und Masse

Ankerbeispiele:

- "Vergleiche gleich große Würfel verschiedener Stoffe und sortiere sie nach steigender Masse. Versuche zunächst ohne, dann mithilfe einer Balkenwaage die Reihenfolge zu bestimmen." (Schulbücher\Chemie2000+: S. 20)

Kodierregeln: Die Kategorie "Dichte-Masse-Beziehung" wird codiert, wenn...

- ... sich die Aufgabe auf den proportionalen Zusammenhang zwischen Dichte und Masse bezieht
- ... anhand der Dichte Aussagen über die Masse getroffen werden sollen
- ... anhand der Masse Aussagen über die Dichte getroffen werden sollen

11

- ... sich die Aufgabe auf den Zusammenhang zwischen der Dichte eines Stoffes/eines Objekts und dem Auf- oder Absteigen in gasförmigen Stoffen bezieht.

2.2.2 Auftrieb in Flüssigkeiten

Definition: Die Aufgabe bezieht sich auf den Zusammenhang zwischen der Dichte eines Stoffes/eines Objekts und dem Auf- oder Absteigen in flüssigen Stoffen.

Ankerbeispiele:

- "Erkläre die Entstehung der Temperaturschichtung in einem See im Sommer bzw. Winter." (Schulbücher\Elemente Chemie 1: S. 124)
- "Eiswürfel schwimmen auf dem Wasser. Was schließt du daraus?" (Schulbücher\Chemie2000+: S. 21)

Kodierregeln:

Die Kategorie "Auftrieb in Flüssigkeiten" wird codiert, wenn...

- ... sich die Aufgabe auf den Zusammenhang zwischen der Dichte eines Stoffes/eines Objekts und dem Auf- oder Absteigen in flüssigen Stoffen bezieht.
- ... anhand der Dichte eines Stoffes/eines Objekts Aussagen über das Auf- oder Absteigen in flüssigen Stoffen getroffen werden sollen.
- ... anhand des Auf- oder Absteigen eines Stoffes/eines Objekts in flüssigen Stoffen Aussagen über die Dichte des Stoffes/des Objekts oder des flüssigen Stoffes getroffen werden sollen.

2.3 Zusammenhang zwischen Dichte und Teilchenebene

Definition: Die Aufgabe bezieht sich auf den Zusammenhang zwischen der Dichte und der Teilchenebene.

Ankerbeispiele:

- "Wenn Eis schmilzt, werden ca. 30 % der Wasserstoffbrückenbindungen aufgebrochen. Erläutere und begründe mithilfe dieser Angabe die Dichteanomalie des Wassers." (Schulbücher\Chemie2000+: S. 167)

Kodierregeln: Die Kategorie "Zusammenhang zwischen Dichte und Teilchenebene" wird codiert, wenn...

- ... Zusammenhänge zwischen der Dichte und der Teilchenebene dargelegt werden müssen.

2.4 Umrechnung $m < \rightarrow V$

2.1.4 Dichte-Volumen-Beziehung

Definition: Die Aufgabe bezieht sich auf den antiproportionalen Zusammenhang zwischen Dichte und Volumen

Ankerbeispiele:



- (Schulbücher\Chemie2000+: S. 156)

Kodierregeln: Die Kategorie "Dichte-Volumen-Beziehung" wird codiert, wenn...

- ... anhand der Dichte Aussagen über das Volumen getroffen werden müssen
- ... anhand des Volumens Aussagen über die Dichte getroffen werden müssen

2.2 Auftrieb

2.2.1 Auftrieb in Gasen

Definition: Die Aufgabe bezieht sich auf den Zusammenhang zwischen der Dichte eines Stoffes/eines Objekts und dem Auf- oder Absteigen in gasförmigen Stoffen.

Ankerbeispiele:

- "Luftballons auf Jahrmärkten sind mit Helium gefüllt. Begründe." (Schulbücher\Fokus Chemie - Gymnasium - Gesamtband Sekundarstufe I: S. 217)
- "Schutzhülle! Du erhältst zwei mit Sauerstoff gefüllte, verschlossene Reagenzgläser. Befestige diese mit der Öffnung nach oben bzw. nach unten an einem Stativ. Entferne die Stopfen und führe nach 3 min die Glimmspanprobe durch. Zieh Rückschlüsse auf die Dichte von Sauerstoff. Entsorgung: Holzspäne einsammeln." (Schulbücher\Fokus Chemie - Gymnasium - Gesamtband Sekundarstufe I: S. 109)

Kodierregeln:

Die Kategorie "Auftrieb in Gasen" wird codiert, wenn...

- ... anhand der Dichte eines Stoffes/eines Objekts Aussagen über das Auf- oder Absteigen in gasförmigen Stoffen getroffen werden sollen.
- ... anhand des Auf- oder Absteigen eines Stoffes/eines Objekts in gasförmigen Stoffen Aussagen über die Dichte des Stoffes/des Objekts oder des gasförmigen Stoffes getroffen werden sollen.

Zu jeder weiteren Größe wird ein eigener Subcode erstellt, wie z.B. "Dichte-Konzentration-Beziehung"

Die Kategorie wird nicht codiert, wenn der Zusammenhang zwischen der Dichte und dem Volumen oder der Masse im Vordergrund steht. Stattdessen erfolgt die Codierung mit den Kategorien:

- "Dichte-Masse-Beziehung"
- "Dichte-Volumen-Beziehung"

2.5.1 Dichte-Konzentration-Beziehung

2.5.2 Dichte-molare Größen-Beziehung

2.5.3 Dichte-Temperatur-Beziehung

3 Darstellung

3.1 Graph

Definition: Die Darstellung stellt Zusammenhänge der Dichte in einem Graphen dar.

Ankerbeispiele:

- 

(Schulbücher\Elemente Chemie 1: S. 34)
- 

(Schulbücher\Elemente Chemie 1: S. 138)

15

2.4.1 m->V

Definition: Die Aufgabe erfordert die Umrechnung einer Masse in ein Volumen mithilfe der Dichte.

Ankerbeispiele:

- "Welches Volumen hat 1 kg Luft?" (Schulbücher\Fokus Chemie - Gymnasium - Gesamtband Sekundarstufe I: S. 39)
- "Ein Stahlbehälter enthält 18 kg Druckluft. Berechne, welches Volumen die Luft hätte, wenn sie nicht zusammengepresst wäre." (Schulbücher\Chemie heute - Si: S. 100)

Kodierregeln:

Die Kategorie "m->V" wird codiert, wenn...

- ... die Umrechnung einer Masse in ein Volumen mithilfe der Dichte gefordert wird.

2.4.2 V->m

Definition: Die Aufgabe erfordert die Umrechnung eines Volumens in eine Masse mithilfe der Dichte.

Ankerbeispiele:

- "Welche Masse hat ein Würfel mit der Kantenlänge 3 cm, a) wenn er aus Blei und b) wenn er aus Aluminium besteht?" (Schulbücher\Chemie2000+: S. 21)
- "Im Märchen „Hans im Glück“ bekommt Hans einen Klumpen Gold ($V = 2000 \text{ cm}^3$) geschenkt. Welche Masse hat dieser Klumpen (vgl. Tab. im Anhang?)" (Schulbücher\Chemie2000+: S. 21)

Kodierregeln:

Die Kategorie "V->m" wird codiert, wenn...

- ... die Umrechnung eines Volumens in eine Masse mithilfe der Dichte gefordert wird.

2.5 Beziehungen zu weiteren Größen

Definition: Die Aufgabe bezieht sich auf den Zusammenhang zwischen der Dichte und weiteren weiteren Größen.

Ankerbeispiele:

- "Wie verändert sich die Dichte von Himbeersaft, wenn du ihn verdünnst?" (Schulbücher > Chemie2000+: S. 21)

Kodierregeln:

Die Kategorie "Beziehungen zu weiteren Größen" wird codiert, wenn...

- ... der Zusammenhang zwischen der Dichte und weiteren Größen im Vordergrund steht.
- ... in Berechnungen die Dichte mit weiteren Größen verknüpft wird.

14



- (Schulbücher\Elemente Chemie 1: S. 34)



- (Schulbücher\Elemente Chemie 1: S. 365)

Kodierregeln: Die Kategorie "Dichtebestimmung" wird codiert, wenn...

- ... die experimentelle Bestimmung der Dichte (z.B. mittels Waage und Volumenverdrängung) abgebildet ist
- ... die Bestimmung der Dichte mittels Aräometer abgebildet ist

3.3.1.2 Dichte-Masse-Beziehung

Definition: In der Darstellung wird ein Experiment/Phänomen dargestellt, das sich auf die Dichte-Masse-Beziehung bezieht.

Ankerbeispiele:



- (Schulbücher\Chemie2000+: S. 21)



- (Schulbücher\Elemente Chemie 1: S. 34)

Kodierregeln: Die Kategorie "Dichte-Masse-Beziehung" wird codiert, wenn...

- ... die Darstellung Experimente/Phänomene darstellt, die sich auf die Dichte-Masse-Beziehung beziehen.

17

Kodierregeln:

Die Kategorie "Auftrieb in Gasen" wird codiert, wenn...

- ... die Dichte auf der x- oder y-Achse eines Graphen aufgetragen ist.
- ... die Dichte als Steigung einer Kurve dargestellt ist.

3.2 tabellarisch als Steckbrief/Stoffliste

Definition: Die Darstellung stellt die Dichte tabellarisch als Steckbrief oder Stoffliste dar.

Ankerbeispiele:

Stoff	Dichte
Wasser	1,000
Alkohol	0,789
Öl	0,920
Quecksilber	13,600
Eisen	7,874
Aluminium	2,700
Kupfer	8,960
Gold	19,300

- (Schulbücher\PRISMA Chemie 1,2: S. 42)

Stoff	Dichte
Wasser	1,000
Alkohol	0,789
Öl	0,920
Quecksilber	13,600
Eisen	7,874
Aluminium	2,700
Kupfer	8,960
Gold	19,300

- (Schulbücher\Chemie2000+: S. 25)

Kodierregeln: Die Kategorie "tabellarisch als Steckbrief/Stoffliste" wird codiert, wenn...

- ... die Dichten verschiedener Stoffe in einer Tabelle aufgeführt werden.
- ... die Dichte in einem Steckbrief aufgeführt wird.

3.3 Experimente/Phänomene

3.3.1 Verhältnis zwischen Masse und Volumen

3.3.1.1 Dichtebestimmung

Definition: In der Darstellung ist die experimentelle Bestimmung der Dichte von Stoffen und Objekten dargestellt.

Ankerbeispiele:

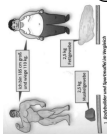
16

3.3.1.3 Dichte-Volumen-Beziehung

Definition: In der Darstellung wird ein Experiment/Phänomen dargestellt, das sich auf die Dichte-Volumen-Beziehung bezieht.

Ankerbeispiele:

- 

(Schulbücher\Chemie2000+: S. 156)
- 

(Schulbücher\Chemie heute - Si: S. 31)

Kodierregeln: Die Kategorie "Dichte-Volumen-Beziehung" wird codiert, wenn...

- ... die Darstellung Experimente/Phänomene darstellt, die sich auf die Dichte-Volumen-Beziehung beziehen.

3.3.2 Auftrieb

3.3.2.1 Auftrieb in Gasen

Definition: In der Darstellung sind Experimente/Phänomene abgebildet, die sich auf den Zusammenhang zwischen der Dichte eines Stoffes/eines Objekts und dem Auf- oder Absteigen in gasförmigen Stoffen beziehen.

Ankerbeispiele:

- 

(Schulbücher\Elemente Chemie 1: S. 103)

- 

(Schulbücher\Chemie heute - Si: S. 184)

Kodierregeln: Die Kategorie "Auftrieb in Gasen" wird codiert, wenn...

- ... in der Darstellung Experimente/Phänomene abgebildet sind, die sich auf den Zusammenhang zwischen der Dichte eines Stoffes/eines Objekts und dem Auf- oder Absteigen in gasförmigen Stoffen beziehen

3.3.2.2 Auftrieb in Flüssigkeiten

Definition: In der Darstellung sind Experimente/Phänomene abgebildet, die sich auf den Zusammenhang zwischen der Dichte eines Stoffes/eines Objekts und dem Auf- oder Absteigen in flüssigen Stoffen beziehen.

Ankerbeispiele:

- 

(Schulbücher\PRISMA Chemie 1,2: S. 336)
- 

(Schulbücher\Elemente Chemie 1: S. 55)

Kodierregeln: Die Kategorie "Auftrieb in Flüssigkeiten" wird codiert, wenn...

- ... in der Darstellung Experimente/Phänomene abgebildet sind, die sich auf den Zusammenhang zwischen der Dichte eines Stoffes/eines Objekts und dem Auf- oder Absteigen in flüssigen Stoffen beziehen

C.2 Lösungsstrategien zur Bestimmung des „schwersten“ Stoffes (Aufgabe 1b, Würfelvorstellung)

Codierleitfaden zur Aufgabe 1b der Würfelvorstellung

Codesystem

1 Masse eines Einheitswürfels
1.1 Aufgabe 1b
1.1.1 Begründung
1.1.1.1 Auf das gleiche Volumen bringen
1.1.1.1.1 unspezifisch
1.1.1.1.2 bestimmter Stoff
1.1.1.1.3 1 cm ³ / 1 Würfel
1.1.1.2 Betrachtung von Volumen und Masse
1.1.1.2.1 mit Vergleich zu anderen Stoffen
1.1.1.2.2 ohne Vergleich zu anderen Stoffen
1.1.1.3 Volumen / Masse am größten
1.1.1.4 Absolute Masse
1.1.1.5 nicht nachvollziehbare Begründung
1.1.1.6 Keine Begründung
1.1.1.7 Würfel vs Volumen
1.1.1.7.1 Würfel
1.1.1.7.2 Volumen
1.1.1.7.3 uneindeutig

1 Masse eines Einheitswürfels

1.1 Aufgabe 1b

1.1.1 Begründung

Bei jeder Begründung wird genau ein Subcode von "Würfel vs Volumen" vergeben.

- ... die Antwort durch die höhere Masse bei gleichem Volumen begründet wird und das Volumen dem Volumen der abgebildeten Stoffportion von Nickel entspricht (2 cm^3)

1.1.1.1.3 $1 \text{ cm}^3 / 1 \text{ Würfel}$

Definition: Die Antwort wird begründet durch den Vergleich der Massen von 1 cm^3 oder einem Würfel.

Ankerbeispiele:

- "Nickel ist am schwersten, da 1 cm^3 am meisten wiegt" (E3_S12_Art)

Kodierregeln:

Die Subkategorie "1 $\text{cm}^3/1 \text{ Würfel}$ " wird codiert, wenn...

- ... die Antwort durch die höhere Masse von einem 1 cm^3 oder einem Würfel begründet wird.

Die Kategorie wird ebenfalls codiert, wenn zwar nicht explizit in der Begründung 1 cm^3 oder ein Würfel angegeben wird, aber durch eine Rechnung oder ein korrektes Ergebnis ersichtlich ist, dass die Masse von 1 cm^3 bzw. einem Würfel gemeint ist, wie z.B.:

Notizen:	
Glas	Kohlenstoffe
$m = 0,5 \text{ g}$	$m = 2 \text{ g}$
$V = 1 \text{ cm}^3$	$V = 1 \text{ cm}^3$
	$V = 1 \text{ cm}^3$
Antwort: Nickel ist das schwerste Stoff, da er bei dem gleichen Volumen eine größere Masse besitzt.	
	(E0_S15_Art)

1.1.1.2 Betrachtung von Volumen und Masse

1.1.1.2.1 mit Vergleich zu anderen Stoffen

Definition: Die Antwort wird begründet durch das Verhältnis zwischen Masse und Volumen unter Bezugnahme zu den anderen Stoffen.

Ankerbeispiele:

- "Der schwerste ist der Nickel, da er fast so viel wie die anderen wiegt, obwohl er der kleinste ist." (E3_S5_Art)
- "Der Stoff Nickel ist am schwersten, da Nickel bei 2 cm^3 schon 18 g wiegt und Glas erst bei 10 cm^3 25 wiegt ." (E0_S9_Art)

Zusätzlich wird bei jeder Begründung genau einer der Codes bzw. Subcodes vergeben.

1.1.1.1 Auf das gleiche Volumen bringen

1.1.1.1.1 unspezifisch

Definition: Die Antwort wird begründet durch den Vergleich der Massen bei gleichem Volumen, ohne dass ein bestimmtes Volumen angegeben wird.

Ankerbeispiele:

- "Der Stoff Nickel ist am schwersten, da er pro Volumen am meisten wiegt." (E3_S19_Art)

Kodierregeln:

Die Subkategorie "unspezifisch" wird codiert, wenn...

- ... die Antwort durch die höhere Masse bei hypothetisch gleichem Volumen begründet wird.
- Die Kategorie wird ebenfalls codiert, wenn keine konkrete Antwort gegeben wird, aber ersichtlich ist, dass durch das Angleichen der Volumina eine Antwort gefunden werden könnte, wie z.B.:
- "Wenn man von allen gleichfiele blöcke hat kann man es herausfinden." (E2_S23_Art)

1.1.1.1.2 bestimmter Stoff

Definition: Die Antwort wird begründet durch den Vergleich der Massen bei gleichem Volumen, das dem Volumen einer der drei abgebildeten Stoffportionen entspricht.

Ankerbeispiele:

- "Nickel ist das schwerste, da wenn man daraus 10 Blöcke macht (wie beim Glas) ist es 90 gramm ." (E1_S14_Art)

Kodierregeln:

Die Subkategorie "bestimmter Stoff" wird codiert, wenn...

- ... die Antwort durch die höhere Masse bei gleichem Volumen begründet wird und das Volumen dem Volumen der abgebildeten Stoffportion von Glas entspricht (10 cm^3)
- ... die Antwort durch die höhere Masse bei gleichem Volumen begründet wird und das Volumen dem Volumen der abgebildeten Stoffportion von Kohlenstoff entspricht (8 cm^3)

Kodierregeln:

Die Subkategorie "mit Vergleich zu anderen Stoffen" wird codiert, wenn...

- ... die Antwort durch das Verhältnis zwischen Masse und Volumen begründet und dabei zu mindestens einem weiteren Stoff Bezug genommen wird.

- ... die Antwort durch das Verhältnis zwischen Masse und Volumen begründet und durch den Komparativ oder Superlativ (z.B. am wenigsten Würfel) ein impliziter Bezug zu den anderen Stoffen erkennbar wird. Ein Superlativ, der lediglich durch die Formulierung einer Antwort auf die Aufgabenstellung entsteht (Nickel ist der schwerste Stoff, da ...), wird nicht als Bezug zu anderen Stoffen gewertet.

Formulierung einer Antwort auf die Aufgabenstellung entsteht (Nickel ist der schwerste Stoff, da ...), wird nicht als Bezug zu anderen Stoffen gewertet.

1.1.1.2.2 ohne Vergleich zu anderen Stoffen

Definition: Die Antwort wird begründet durch das Verhältnis zwischen Masse und Volumen, ohne Bezugnahme zu den anderen Stoffen.

Ankerbeispiele:

- "Nickel hat mehr Gewicht bei weniger Volumen" (E1_S8_Art)

Kodierregeln:

Die Subkategorie "ohne Vergleich zu anderen Stoffen" wird codiert, wenn...

- ... die Antwort durch das Verhältnis zwischen Masse und Volumen begründet und dabei zu keinem weiteren Stoff Bezug genommen wird.

1.1.1.3 Volumen / Masse am größten

Definition: Die Antwort wird begründet durch die Bestimmung des Verhältnisses von Volumen zu Masse.

Ankerbeispiele:

- "Kohlenstoff ist der schwerste Stoff, da das Volumen durch die Masse am meisten ergibt." (E0_S5_Art)

Kodierregeln:

Die Kategorie "Volumen/Masse am größten" wird codiert, wenn...

- ... die Antwort durch die Bestimmung des Verhältnisses von Volumen zu Masse begründet.

1.1.1.4 Absolute Masse

Definition: Die Antwort wird begründet durch die absolute Masse der Stoffportion.

Ankerbeispiele:

- "Gas ist der schwerste Stoff, weil es mehrere Würfel enthält, welches ihn am schwersten macht." (E1_S13_Art)

Kodierregeln:

Die Kategorie "Absolute Masse" wird codiert, wenn...

- ... die Antwort durch die absolute Masse der Stoffportion, statt der Masse in Relation zum Volumen begründet wird.

1.1.1.5 nicht nachvollziehbare Begründung

Definition: Die Antwort wird nicht nachvollziehbar begründet.

Ankerbeispiele:

- "Kohlenstoff schwerster Stoff weil darin ist viel mehr Masse in Kohlenst." (E1_S18_Art)
- "Nickel ist am schwersten, da die anderen Stoffe viel größer sind und trotzdem fast gleich groß sind." (E0_S13)

Kodierregeln:

Die Kategorie "nicht nachvollziehbare Begründung" wird codiert, wenn...

- ... lediglich eine nicht nachvollziehbare Rechnung angegeben wird.
- ... wenn Volumen und Masse nicht trennscharf voneinander verwendet und dadurch die Begründung nicht nachvollziehbar wird.

1.1.1.6 Keine Begründung**1.1.1.7 Würfel vs Volumen****1.1.1.7.1 Würfel**

Definition: Die Begründung lässt einen Bezug zur Konkretisierung des Volumens in Form von Würfeln erkennen.

Ankerbeispiele:

- "Kohlenstoffschwerster Stoff weil darin ist viel mehr Masse in Kohlenst." (E1_S18_Art)

Kodierregeln:

Die Subkategorie "uneindeutig" wird codiert, wenn...

- ... sich lediglich auf die Masse bezogen wird.
- ... lediglich eine Rechnung ohne Einheiten angegeben wird.

Ankerbeispiele:

- "Nickel ist am schwersten, weil ein Würfel 6 g wiegt." (EO_S8_Art)

Kodierregeln:

Die Subkategorie "Würfel" wird codiert, wenn...

- ... in der Begründung explizit von Würfeln (oder alternative Formulierungen, wie z.B.: Blöcke oder Teile) gesprochen wird.

Die Kategorie wird ebenfalls codiert, wenn zwar nicht explizit in der Begründung von Würfeln gesprochen wird, aber in der Begründung ersichtlich ist, dass eine Anzahl gemeint ist, wie z.B.:

- "Weil 1 Nickel m = 9 g und das heißt das er mehr wiegt als der rest." (E1_S5)

1.1.1.7.2 Volumen

Definition: Die Begründung abstrahiert von konkreten Würfeln und bezieht sich auf das Volumen.

Ankerbeispiele:

- "Nickel ist am schwersten, da die anderen Stoffe viel größer sind und trotzdem fast gleich groß sind." (EO_S13)

Kodierregeln:

Die Subkategorie "Volumen" wird codiert, wenn...

- ... in der Begründung explizit von Volumen (oder alternative Formulierungen, wie z.B. Menge oder Größe) oder Kubikzentimeter (bzw. cm³) gesprochen wird.

Die Kategorie wird nicht codiert, wenn zwar explizit von dem Volumen oder Kubikzentimeter gesprochen wird, aber in der Begründung zusätzlich von Würfeln gesprochen wird. Stattdessen wird die Subkategorie "Würfel" codiert. Beispiel:

Notizen:

- das Spiel ist schwerer
- Nickel ist 2 cm³ schwerer als Blei
- Nickel ist 2 cm³ schwerer als Blei
- Nickel ist 2 cm³ schwerer als Blei

Antwort: Nickel ist am schwersten, weil es ein Würfel ist. (EO_S8_Art)

1.1.1.7.3 uneindeutig

Definition: Die Begründung bezieht sich weder auf das Volumen oder Kubikzentimeter noch auf die Anzahl von Würfeln.

C.3 Ablenkungen

Codierregel zur Codierung der Ablenkungen in E3

Ablenkung

Definition: Die Lernenden richten ihre Aufmerksamkeit während der Lernphase auf andere, nicht zur Aufgabe gehörende Aktivitäten.

Kodierregeln:

Die Kategorie "Ablenkung" wird codiert, wenn...

- ... sich die Lernenden über Themen austauschen, die keinen Bezug zu den Lerninhalten aufweisen, und währenddessen keine Bearbeitung der Lernmaterialien erkennbar ist.
- ... sich die Lernenden über Themen austauschen, die keinen Bezug zu den Lerninhalten aufweisen, und währenddessen die Lösungen der Aufgaben von einer anderen Person abgeschrieben werden.
- ... sich die Lernenden während Plenumsphasen über Themen austauschen, die keinen Bezug zu den Lerninhalten aufweisen.
- ... die Lernenden Handlungen nachgehen, die keinen Bezug zu den Lerninhalten aufweisen (z.B. Wechseln der Kamera, Verwendung von nicht-lernbezogenen Tabletfunktionen, Herumspielen mit Experimentiermaterialien, ...), und währenddessen nicht über Inhalte der Lernmaterialien kommunizieren.

Die Kategorie "Ablenkung" wird nicht codiert, wenn...

- ... die Lernenden innerhalb einer Murmelphase abgelenkt sind.
- ... die Lernenden nach der Fertigstellung aller vorgesehenen Aufgaben in einer Arbeitsphase abgelenkt sind.
- ... sich die Lernenden über Themen austauschen, die keinen Bezug zu den Lerninhalten aufweisen, aber währenddessen eine Bearbeitung der Lernmaterialien erkennbar ist.
- ... die Lernenden Handlungen nachgehen, die keinen Bezug zu den Lerninhalten aufweisen (z.B. Wechseln der Kamera, Verwendung von nicht-lernbezogenen Tabletfunktionen, Herumspielen mit Experimentiermaterialien, ...), aber währenddessen über Inhalte der Lernmaterialien kommunizieren.
- ... sich die Lernenden in der Aufräumphase nach dem Schokoriegelexperiment befinden.

Weitere Hinweise zur Codierung:

- Die Ablenkungen werden ausschließlich für die Person codiert, die die Kamera trägt.
- Den Start- und Endzeitpunkt der Ablenkung stellt das erste Ab- bzw. Zuwenden zu den Lernmaterialien dar.

- Eine Ablenkung wird erst codiert, wenn die Person mit der Kamera ihre Aufmerksamkeit für mindesten 20 Sekunden von den Lernmaterialien abwendet.
- Eine Ablenkung gilt erst dann als beendet, wenn die Person mit der Kamera für mindestens 20 Sekunden die Aufmerksamkeit auf die Lernmaterialien richtet.
- Ablenkungen werden in dem Interventionszeitraum (132 min) codiert, der mit dem Klatschen beginnt und mit der Aufforderung zum Beenden der Arbeit endet. Ausgenommen ist die Pause zwischen der ersten und zweiten Unterrichtseinheit.

C.4 Testauswertung

Codierleitfaden zur Testauswertung

Codesystem

1 1) Welcher Würfel schwimmt in Wasser? Kreuze an und begründe deine Vermutung!
1.1 Antwort
1.1.1 richtiger Würfel schwimmt (0.5)
1.1.2 falscher Würfel schwimmt
1.1.3 beide Würfel schwimmen
1.1.4 kein Würfel schwimmt
1.1.5 keine Antwort
1.2 Begründung
1.2.1 Begründung mit Dichte
1.2.1.1 richtig (1)
1.2.1.2 unkonkret (0.5)
1.2.1.3 falscher Zusammenhang (0.5)
1.2.2 Begründung mit Masse
1.2.3 Begründung mit Volumen
1.2.4 Begründung mit Stoff
1.2.5 Begründung mit Luft/Sauerstoff
1.2.6 Sonstige Begründungen
1.2.7 keine Begründung
1.3 Relation
1.3.1 keine Relation
1.3.2 unkonkrete Relation (0.5)
1.3.3 Relation zu anderem Würfel (0.5)
1.3.4 Relation zum umliegenden Stoff (1)
2 2) Ballon mit Wassestoff steigt nach oben/Ballon mit CO ₂ sinkt zu Boden. Wie erklärst du dir diese Beobachtung?
2.1 Begründung
2.1.1 Begründung mit Dichte
2.1.1.1 richtig (1)
2.1.1.2 unkonkret (0.5)
2.1.1.3 falscher Zusammenhang (0.5)

2.1.2 Begründung mit Masse
2.1.3 Begründung mit Stoff
2.1.4 Begründung mit Gas
2.1.5 Begründung mit Luft
2.1.6 Sonstige Begründungen
2.1.7 keine Begründung
2.2 Relation
2.2.1 keine Relation
2.2.2 unkonkrete Relation (0.5)
2.2.3 Relation zum Ballon (0.5)
2.2.4 Relation zum umliegenden Stoff (1)
3.3) Hast du schon mal den Begriff "Dichte" gehört? Schreibe alles auf, was du über Dichte weißt!
3.1 Relation zu Masse und Volumen
3.1.1 Masse pro Kubikzentimeterwürfel
3.1.1.1 richtig (1)
3.1.1.2 ungenau (0.5)
3.1.2 Masse von Stoffen verhältnismäßig vergleichen
3.1.2.1 richtig (1)
3.1.2.2 ungenau (0.5)
3.1.3 Masse pro Volumen (1)
3.1.4 Masse und Volumen (0.5)
3.1.5 Masse
3.1.6 Volumen
3.2 Stoffeigenschaft (1)
3.3 Auftrieb
3.3.1 richtig (1)
3.3.2 falscher Zusammenhang (0.5)
3.4 Formeln, Einheiten und Symbole
3.4.1 richtig (1)
3.4.1.1 Dichte = Masse(m)/Volumen(V)
3.4.1.2 $\rho(\text{Dichte}) = \frac{m(\text{gramm})}{V(\text{cm}^3)}$ (Kubikzentimeter)
3.4.1.3 Masse geteilt durch Volumen
3.4.1.4 m/V

3.4.1.5 m/V mit Würfel erklärt
3.4.1.6 g/cm^3
3.4.1.7 ρ
3.4.2 unkonkret
3.4.2.1 Formeln
3.4.2.2 Einheit
3.4.3 falsch
3.4.3.1 Volumen* Masse
3.4.3.2 Kg/V (0.5)
3.4.3.3 Länge*Volumen
3.4.3.4 nanometer
3.4.3.5 Dichte wird in ρ angegeben (0.5)
3.5 alternative Vorstellungen
3.5.1 Undurchlässigkeit (luft- oder wasserdicht)
3.5.2 Inneres eines Stoffes/Gegenstandes
3.5.3 Gedichte
3.5.4 Teilchennähe
3.5.5 Teilchen pro Volumen/Fläche
3.5.6 Enge/Nähe
3.5.7 kleine Teilchen
3.5.8 Festigkeit
3.5.9 Massivität
3.5.10 Härte
3.5.11 Dicke
3.5.12 Maß für enthaltene Luft
3.5.13 Löslichkeit
3.5.14 Leitfähigkeit
3.5.15 Gesamtwert
3.5.16 Mengenangabe
3.5.17 Nebeldichte
3.5.18 Schutz und Beständigkeit
3.5.19 Schichten eines Gegenstandes
3.5.20 Oberflächenbeschaffenheit/-spannung
3.5.21 Fülle

5.1.2.2 ungenau (0.5)
5.1.2.3 Wert=Masse÷Volumen
5.1.3 Masse und Volumen (0.5)
5.1.4 Masse oder Volumen
5.2 Auftrieb
5.2.1 Auftrieb in der Luft
5.2.1.1 richtig (1)
5.2.1.2 falsch (0.5)
5.2.2 Auftrieb in Wasser (1)
5.3 Teilchennähe
5.4 Rechnung
5.4.1 richtig (1)
5.4.2 unkonkret
5.4.3 falsch
5.5 Dichte
5.6 Sonstige Antworten
5.7 keine Antwort

1 1) Welcher Würfel schwimmt in Wasser? Kreuze an und begründe deine Vermutung!

Bei dieser Aufgabe wird das gesamte Analyseelement hinsichtlich der angekreuzten "Antwort", der "Begründung" sowie der "Relation" codiert. Nur bei der Begründung können Mehrfachcodierungen auftreten.

Beispiel: "X beide Würfel
Begründung: Ich glaube beide Würfel schwimmen, weil Holz ist leicht und Aluminium hat eine hohe Dichte. (Weiß ich aber nicht genau)" (E3_Prätest > S8: 2-3)

Die gesamte Analyseeinheit wird in diesem Fall mit den Subkategorien "beide Würfel schwimmen", "Begründung mit Masse", "Begründung mit Dichte" und "keine Relation" codiert.

1.1 Antwort

Diese Kategorie dient lediglich der Erfassung der angekreuzten Antworten. Entsprechend der gesetzten Kreuze werden die entsprechenden Subkategorien statt der Kategorie "Antwort" codiert.

3.5.22 Anteil
3.6 Sonstige Antworten
3.7 keine Antwort
4.4) kleines und großes Stück Eisen /Kupferdraht wird abgeschnitten. Inwiefern unterscheidet sich die Dichte?
4.1 Antwort
4.1.1 Dichte ist gleich (1)
4.1.2 Dichte ist nur bei gleichem Volumen gleich (0.5)
4.1.3 Dichte unterscheidet sich
4.1.3.1 proportionale Volumen-Dichte-Beziehung
4.1.3.2 antiproportionale Volumen-Dichte-Beziehung
4.1.3.3 unspezifisch
4.1.4 Masse unterscheidet sich
4.1.4.1 proportionale Volumen-Masse Beziehung
4.1.4.2 antiproportionale Volumen-Masse-Beziehung
4.1.4.3 unspezifisch
4.1.5 Volumen unterscheidet sich
4.1.6 keine Antwort
4.1.7 Sonstige Antworten
4.2 Begründung
4.2.1 Masse pro Kubikzentimeter (1)
4.2.2 auf gleiche Größe bringen (1)
4.2.3 Stoff (1)
4.2.4 Masse
4.2.5 Volumen
4.2.6 Sonstige Begründungen
4.2.7 keine Begründung
5.5) Die Dichte von Schwefel beträgt 2 g/cm3/von Natrium beträgt 0.97 g/cm3. Was bedeutet dieser Wert für dich?
5.1 Relation zu Masse und Volumen
5.1.1 Masse pro Kubikzentimeter(-Würfel)
5.1.1.1 richtig (1)
5.1.1.2 ungenau (0.5)
5.1.2 Masse pro Kubikzentimeter
5.1.2.1 richtig (1)

1.2.1.1 richtig (1)

Definition: Das Schwimmen eines Würfels wird mithilfe der Dichte begründet und der richtige Zusammenhang (hohe Dichte -> sinkt, geringe Dichte -> schwimmt) ist erkennbar.

Ankerbeispiele:

- "Da er eine kleinere Dichte hat." (E3_Follow-Up > S12: 1-2)
- "Der Holzwürfel schwimmt, da ein Kubikzentimeter Würfel Holz leichter als ein Kubikzentimeter Würfel Aluminium ist." (E2_Posttest > S9: 2-3)

Kodierregeln:

Die Kategorie "richtig" wird codiert, wenn...

- ... die Dichte explizit genannt wird und der richtige Zusammenhang erkennbar ist.
- ... mithilfe der Masse eines Kubikzentimeter-Würfels argumentiert wird und der richtige Zusammenhang erkennbar ist.

Die Kategorie wird ebenfalls codiert, wenn...

- ... der richtige Zusammenhang nicht von dem Würfel, sondern von dem Wasser ausgehend erkannt wird, wie z.B.:

"Die Dichte von Wasser ist mehr als von dem Holzwürfel und so schwimmt er." (E3_Posttest > S14: 1-2)

- ... der richtige Zusammenhang erkennbar ist, aber die Dichte als nicht hoch bzw. niedrig genug angesehen wird, wie z.B.:

"Der Aluminium Würfel ist Dichter aber er geht trotzdem nicht unter." (E2_Posttest > S25: 2-3)

- ... der richtige Zusammenhang implizit über das Verhältnis von Masse und Volumen erkannt wird, wie z.B.:

"weil beim holzwürfel ist die masse geringer als das volumen vom holzwürfel und bei dem aluminiumwürfel ist es mehr masse als volumen." (E2_Posttest > S1: 2-3)

1.2.1.2 unkongret (0.5)

Definition: Das Schwimmen eines Würfels wird mithilfe der Dichte begründet, ohne einen Zusammenhang anzugeben.

Ankerbeispiele:

- "Die Dichte ist beim Holz sinnvoll" (E3_Posttest > S19: 1-2)

Kodierregeln:

Die Kategorie "unkongret" wird codiert, wenn...

- ... die Dichte explizit genannt wird, aber kein Zusammenhang angegeben wird.

Die Kategorie wird ebenfalls codiert, wenn das Schwimmverhalten sowohl mit der Masse, als auch mit dem Volumen begründet wird, aber kein Zusammenhang zwischen den Größen hergestellt wird, wie z.B.:

1.1.1 richtiger Würfel schwimmt (0.5)

1.1.2 falscher Würfel schwimmt

1.1.3 beide Würfel schwimmen

1.1.4 kein Würfel schwimmt

1.1.5 keine Antwort

1.2 Begründung

Bei dieser Kategorie können Mehrfachcodierungen auftreten, wenn mehrere Gründe für das Schwimmverhalten genannt werden (siehe Beispiel zu Aufgabe 1).

Gründe dafür, wieso beispielsweise der eine Würfel schwerer ist als der andere, werden nicht codiert, wie z.B.:

"weil Holz schwerer wird weil es sich voll saugt" (E1_Posttest > S3: 2-3)

In diesem Beispiel ist die Begründung "weil Holz schwerer wird" ausschlaggebend für die Codierung. Die Begründung "weil es sich voll saugt" ist irrelevant für die Codierung, da sie zur Begründung für die Massenzunahme, statt für das Schwimmverhalten verwendet wird.

1.2.1 Begründung mit Dichte

1.2.4 Begründung mit Stoff

Definition: Das Schwimmen eines Würfels wird mithilfe des Stoffes begründet.

Ankerbeispiele:

- "Ich glaube, dass der Holzwürfel im Wasser schwimmt, weil ein Segelboot auch schwimmt wenn es aus Holz gebaut ist." (E3_Prätest > S9: 2-3)

Kodierregeln:

Die Kategorie "Begründung mit Stoff" wird codiert, wenn...

- ... die Schwimmfähigkeit auf den Stoff an sich zurückgeführt wird.
- ... die Schwimmfähigkeit der Würfel mit anderen Objekten aus dem gleichen Stoff begründet wird.

1.2.5 Begründung mit Luft/Sauerstoff

Definition: Das Schwimmen eines Würfels wird mithilfe von Luft oder Sauerstoff begründet.

Ankerbeispiele:

- "Im Holz ist Sauerstoff und dieses bleibt bekanntlich oben. Das Aluminium hat eine höhere Dichte und deswegen treibt es oben." (E3_Prätest > S4: 2-3)

Kodierregeln:

Die Kategorie "Begründung mit Luft/Sauerstoff" wird codiert, wenn...

- ... die Schwimmfähigkeit auf die in einem Würfel enthaltene Luft bzw. den enthaltenen Sauerstoff zurückgeführt wird.

1.2.6 Sonstige Begründungen

1.2.7 keine Begründung

Definition: Es wird keine Begründung angegeben.

Ankerbeispiele:

- "Man weiß das beides schwimmt" (E0_Posttest > S18: 2-3)

Kodierregeln:

Die Kategorie "keine Begründung" wird codiert, wenn...

- ... nichts geschrieben wurde.
- ... keine Begründung erkennbar ist.

- "Es kommt drauf an wie viel Volumen die Würfel haben und wie viel Masse" (E0_Posttest > S6: 2-3)

1.2.1.3 falscher Zusammenhang (0.5)

Definition: Das Schwimmen eines Würfels wird mithilfe der Dichte begründet und der falsche Zusammenhang (hohe Dichte -> schwimmt, geringe Dichte -> sinkt) ist erkennbar.

Ankerbeispiele:

- "Im Holz ist Sauerstoff und dieses bleibt bekanntlich oben. Das Aluminium hat eine höhere Dichte und deswegen treibt es oben." (E3_Prätest > S4: 2-3)

Kodierregeln:

Die Kategorie "falscher Zusammenhang" wird codiert, wenn...

- ... die Dichte explizit genannt wird und der falsche Zusammenhang erkennbar ist.

1.2.2 Begründung mit Masse

Definition: Das Schwimmen eines Würfels wird mit der Masse begründet.

Ankerbeispiele:

- "Weil der Holzwürfel leichter ist." (E3_Prätest > S1: 2-3)

Kodierregeln:

Die Kategorie "Begründung mit Masse" wird codiert, wenn...

- ... Begriffe wie "leicht", "schwer" oder "wiegen" verwendet werden.

1.2.3 Begründung mit Volumen

Definition: Das Schwimmen eines Würfels wird mit dem Volumen begründet.

Ankerbeispiele:

- "Weil sie das selbe Volumen haben" (E1_Posttest > S9: 2-3)

Kodierregeln:

Die Kategorie "Begründung mit Volumen" wird codiert, wenn...

- ... mit dem Volumen oder der Größe der Würfel argumentiert wird.

Ankerbeispiele:

- "Da das Gold mehr gram hat als das Gummi, denke ich dass es der Gummwürfel ist." (E3_Follow-Up > S10: 1-2)

Kodierregeln:

Die Kategorie "Relation zu anderem Würfel" wird codiert, wenn...

- ... die Adjektive in der Komparativ- (leichter, geringer, mehr) oder Superlativform (am leichtesten, am höchsten,...) angegeben sind und der Bezug eindeutig zum Stoff des Würfels gegeben ist (z.B. durch ein "als").

Die Kategorie wird nicht codiert, wenn zwar auf beide Würfel eingegangen wird, aber diese nicht miteinander in Relation gesetzt werden, z.B.:

- "weil beim holzwürfel ist die masse geringer als das volumen vom holzwürfel und bei dem aluminiumwürfel ist es mehr masse als Volumen" (E2_Posttest > S1: 2-3)

Stattdessen wird die Kategorie "keine Relation" codiert.

1.3.4 Relation zum umliegenden Stoff (1)

Definition: Es wird eine Relation zum umliegenden Stoff angegeben.

Ankerbeispiele:

- "Weil die dichte von Wasser beträgt 1 g/cm3 Alles was kleiner ist schwimmt." (E3_Posttest > S12: 1-2)

Kodierregeln:

Die Kategorie "Relation zum umliegenden Stoff" wird codiert, wenn...

- ... die Adjektive in der Komparativ- (leichter, geringer, mehr) oder Superlativform (am leichtesten, am höchsten,...) angegeben sind und der Bezug eindeutig zum umliegenden Stoff (Wasser) gegeben ist (z.B. durch ein "als").

2 2) Ballon mit Wassestoff steigt nach oben/Ballon mit CO2 sinkt zu Boden. Wie erklärst du dir diese Beobachtung?

Bei dieser Aufgabe sind wie bei Aufgabe 1 Mehrfachcodierungen bei der Kategorie "Begründung" möglich.

Es werden allerdings nur mehrere Begründungen codiert, wenn diese als unabhängige Gründe für das Aufsteigen/Sinken des Ballons genannt werden, z.B.:

"Der Ballon steigt, weil das Helium ein Stoff ist was direkt in die Luft steigt und helium hat weniger Dichte als Luft" (E1_Posttest > S19: 4)

11

Die Kategorie wird nicht codiert, wenn die Analyseeinheit bereits mit der Kategorie "keine Antwort" codiert wurde.

1.3 Relation

Diese Kategorie wird nur codiert, wenn die Begründungen mit "Begründung mit Dichte > richtig", "Begründung mit Dichte > falscher Zusammenhang", "Begründung mit Volumen" oder "Begründung mit Masse" codiert wurden.

1.3.1 keine Relation

Definition: Es wird keine Relation zu einem anderen Stoff angedeutet.

Ankerbeispiele:

- "Da der Aluminiumwürfel sehr leicht ist und deswegen denke ich dass es der Aluminiumwürfel ist" (E3_Prätest > S5: 2-3)

Kodierregeln:

Die Kategorie "keine Relation" wird codiert, wenn...

- ... die Adjektive in der Positivform (leicht, schwer, dicht, gering, ...) angegeben sind und somit kein Bezug zu einem anderen Stoff angedeutet wird.

1.3.2 unkonkrete Relation (0.5)

Definition: Es wird eine Relation zu einem anderen Stoff angedeutet, aber nicht explizit genannt.

Ankerbeispiele:

- "Da das Aluminium dichter ist." (E3_Posttest > S2: 1-2)

Kodierregeln:

Die Kategorie "unkonkrete Relation" wird codiert, wenn...

- ... die Adjektive in der Komparativ- (leichter, geringer, mehr,...) oder Superlativform (am leichtesten, am höchsten,...) angegeben sind und somit ein Bezug zu einem anderen Stoff angedeutet wird, aber kein Bezugsstoff explizit genannt wird.
- ... Wörter verwendet werden, die eine Relation andeuten (z.B. "zu"), aber kein Bezugsstoff explizit genannt wird.

1.3.3 Relation zu anderem Würfel (0.5)

Definition: Es wird eine Relation zu dem Stoff des anderen Würfels angegeben.

10

Durch das Wort "und" wird in diesem Fall deutlich, dass zwei unabhängige Begründungen geliefert werden, sodass die Antwort sowohl mit dem Code "Begründung mit Stoff", als auch mit dem Subcode "Begründung mit Dichte -> richtig" codiert wird.

In dem folgenden Beispiel wird allerdings nur die Kategorie "Begründung mit Masse" und nicht noch die Kategorie "Begründung mit Gas", weil nur "leichter als Luft" als Begründung angegeben wird:

"Helium ist ein gasförmiger und sehr leichter Stoff, weil das leichter als Luft ist, steigt ein Ballon in die Luft." (E0_Prätest > S12: 4)

2.1 Begründung

2.1.1 Begründung mit Dichte

2.1.1.1 richtig (1)

Definition: Das Aufsteigen/Sinken des Ballons wird mithilfe der Dichte begründet und der richtige Zusammenhang (hohe Dichte -> sinkt, geringe Dichte -> steigt auf) ist erkennbar.

Ankerbeispiele:

- "Kohlendioxid hat eine größere Dichte als die Luft." (E3_Follow-Up > S18: 3)

Kodierregeln:

Die Kategorie "richtig" wird codiert, wenn...

- ... die Dichte explizit genannt wird und der richtige Zusammenhang erkennbar ist.

Die Kategorie wird ebenfalls codiert, wenn der richtige Zusammenhang implizit über das Verhältnis von Masse und Volumen erkannt wird, wie z.B.:

"Der gefüllte Ballon hat viel Volumen und weniger Masse." (E0_Posttest > S6: 4)

2.1.1.2 unkonkret (0.5)

Definition: Das Aufsteigen/Sinken des Ballons wird mithilfe der Dichte begründet, ohne einen Zusammenhang anzugeben.

Ankerbeispiele:

- "weil Dichte" (E3_Posttest > S23: 3-4)

Kodierregeln:

Die Kategorie "unkonkret" wird codiert, wenn...

- ... die Dichte explizit genannt wird, aber kein Zusammenhang angegeben wird.

Die Kategorie wird ebenfalls codiert, wenn...

- ... die Dichte explizit genannt wird, aber der Zusammenhang unverständlich formuliert wird, wie z.B.:

"Der Kohlenstoffdioxid sinkt, weil er von der Dichte eingeschränkt ist." (E3_Follow-Up > S5: 4)

2.1.1.3 falscher Zusammenhang (0.5)

Definition: Das Aufsteigen/Sinken des Ballons wird mithilfe der Dichte begründet und der falsche Zusammenhang (hohe Dichte -> steigt auf, geringe Dichte -> sinkt) ist erkennbar.

Ankerbeispiele:

- "Wasserstoff hat eine hohe Dichte. Deswegen steigt er nach oben." (E3_Prätest > S4: 4)

Kodierregeln:

Die Kategorie "falscher Zusammenhang" wird codiert, wenn...

- ... die Dichte explizit genannt wird und der falsche Zusammenhang erkennbar ist.

2.1.2 Begründung mit Masse

Definition: Das Aufsteigen/Sinken des Ballons wird mit der Masse begründet.

Ankerbeispiele:

- "Wasserstoff ist leichter als Luft." (E3_Prätest > S18: 4)

Kodierregeln:

Die Kategorie "Begründung mit Masse" wird codiert, wenn...

- ... Begriffe wie "leicht", "schwer" oder "wiegen" verwendet werden.

2.1.3 Begründung mit Stoff

Definition: Das Aufsteigen/Sinken des Ballons wird mithilfe des Stoffes begründet.

Ankerbeispiele:

- "weil Helium ist ein Stoff der alles schweben lässt" (E2_Posttest > S8: 4)

Kodierregeln:

Die Kategorie "Begründung mit Stoff" wird codiert, wenn...

2.1.6 Sonstige Begründungen

2.1.7 keine Begründung

Definition: Es wird keine Begründung angegeben.

Ankerbeispiele:

- "Soweit ich den Luftballon in die Luft lasse fliegt er immer höher bis er die Luft verliert dann kommt er wieder runter." (E2_Prätest > S21: 4)

Kodierregeln:

Die Kategorie "keine Begründung" wird codiert, wenn...

- ... nichts geschrieben wurde.
- ... keine Begründung sondern nur eine Beschreibung des Phänomens erkennbar ist.

2.2 Relation

Diese Kategorie wird nur codiert, wenn die Begründungen mit "Begründung mit Dichte > richtig", "Begründung mit Dichte > falscher Zusammenhang" oder "Begründung mit Masse" codiert wurden.

Wenn sowohl mit der Dichte, als auch mit der Masse begründet wird, zählt nur die konkretere genannte Relation (anhand der Farbe erkennbar: rot < gelb < grün), z.B.:

"Helium hat eine sehr geringe Dichte und ist leichter als Luft und steigt deshalb nach oben."
(E0_Posttest > S17: 4)

Bei der Begründung mit der Dichte ist "keine Relation" erkennbar, während bei der Begründung mit der Masse eine "Relation zum umliegenden Stoff" erkennbar ist. Da letzteres die konkretere Relation ist, wird die gesamte Analyseseinheit nur mit der Subkategorie "Relation zum umliegenden Stoff" codiert.

2.2.1 keine Relation

Definition: Es wird keine Relation zu einem anderen Stoff angedeutet.

Ankerbeispiele:

- "Die dichte des Wasserstoffs ist hoch und so steigt es auf" (E3_Posttest > S14: 3)

Kodierregeln:

Die Kategorie "keine Relation" wird codiert, wenn...

- ... das Aufsteigen/Sinken auf den Stoff an sich zurückgeführt wird.
- ... das Aufsteigen/Sinken implizit auf den Stoff durch Abgrenzung zu einem anderen Stoff zurückgeführt wird, wie z.B.:
"da das kein Helium ist" (E3_Follow-Up > S26: 3)
- ... der Stoff zwar mit Luft oder Gasen verglichen oder als solches bezeichnet wird, aber das Aufsteigen/Sinken dennoch auf den Stoff an sich zurückgeführt wird, wie z.B.:
"Helium ist ja Gas glaube ich und wenn man Helium in den Ballon füllt dann steigt er nach oben weil Helium ja in der Luft schweben kann" (E2_Prätest > S24: 4)

Die Kategorie wird ebenfalls codiert, wenn allgemein von "dem Stoff" im Ballon gesprochen wird, anstatt von Helium oder Kohlenstoffdioxid, wie z.B.:

- "Es steigt, da es ein Stoff im Ballon gibt" (E3_Prätest > S12: 4)

2.1.4 Begründung mit Gas

Definition: Das Aufsteigen/Sinken des Ballons wird mithilfe von Gasen begründet.

Ankerbeispiele:

- "Da in dem Ballon Gas drinnen ist steigt es" (E1_Posttest > S11: 4)

Kodierregeln:

Die Kategorie "Begründung mit Gas" wird codiert, wenn...

- ... das Aufsteigen/Sinken auf Gase im Allgemeinen zurückgeführt wird.

2.1.5 Begründung mit Luft

Definition: Das Aufsteigen/Sinken des Ballons wird mithilfe der Luft begründet.

Ankerbeispiele:

- "Der Ballon steigt auf, weil die Luft immer an die Oberfläche will." (E3_Posttest > S15: 4)

Kodierregeln:

Die Kategorie "Begründung mit Luft" wird codiert, wenn...

- ... das Aufsteigen/Sinken auf die Luft, "Luftphänome" (z.B. Luftdruck, warme Luft, dicke/dünne Luft) zurückgeführt wird.

- ... die Adjektive in der Komparativ- (leichter, geringer, mehr) oder Superlativform (am leichtesten, am höchsten,...) angegeben sind und der Bezug eindeutig zum umliegenden Stoff (Luft) gegeben ist (z.B. durch ein "als").

3 3) Hast du schon mal den Begriff "Dichte" gehört? Schreibe alles auf, was du über Dichte weißt!

Bei dieser Aufgabe sind Mehrfachcodierungen möglich.

Beispiel: "ist dichte vielleicht wie dick ein Stoff ist und so was mit Gewichte" (E2_Prätest > S3: 5)

Diese Antwort wird mit den Subcodes "Masse" und "Stoffdicke" codiert.

3.1 Relation zu Masse und Volumen

3.1.1 Masse pro Kubikzentimeterwürfel

3.1.1.1 richtig (1)

Definition: Die Dichte wird als Masse eines Kubikzentimeterwürfels interpretiert und inhaltlich richtig formuliert.

Ankerbeispiele:

- "Gewicht pro Kubikzentimeter(-würfel)" (E3_Posttest > S26-4)

Kodierregeln:

Die Kategorie "richtig" wird codiert, wenn...

- ... explizit der Würfel erwähnt wird und die Dichte als Masse (oder alternative Bezeichnungen wie z.B.: Schwere, Gramm, Gewicht,...) dieses Würfels interpretiert wird.

3.1.1.2 ungenau (0.5)

Definition: Die Dichte wird als Masse eines Kubikzentimeterwürfels interpretiert, aber inhaltlich ungenau formuliert.

17

- ... die Adjektive in der Positivform (leicht, schwer, dicht, gering, ...) angegeben sind und somit kein Bezug zu einem anderen Stoff angedeutet wird.

2.2.2 unkonkrete Relation (0.5)

Definition: Es wird eine Relation zu einem anderen Stoff angedeutet, aber nicht explizit genannt.

Ankerbeispiele:

- "Weil es eine zu große dicke hat." (E3_Follow-Up > S14: 3)

Kodierregeln:

Die Kategorie "unkonkrete Relation" wird codiert, wenn...

- ... die Adjektive in der Komparativ- (leichter, geringer, mehr,...) oder Superlativform (am leichtesten, am höchsten,...) angegeben sind und somit ein Bezug zu einem anderen Stoff angedeutet wird, aber kein Bezugstoff explizit genannt wird.
- ... Wörter verwendet werden, die eine Relation andeuten (z.B. "zu" oder "so"), aber kein Bezugstoff explizit genannt wird.

2.2.3 Relation zum Ballon (0.5)

Definition: Es wird eine Relation zu dem Ballon angegeben.

Ankerbeispiele:

- "Das Helium ist leichter als der Ballon und will an die Oberfläche" (E1_Posttest > S6: 4)

Kodierregeln:

Die Kategorie "Relation zu anderem Würfel" wird codiert, wenn...

- ... die Adjektive in der Komparativ- (leichter, geringer, mehr) oder Superlativform (am leichtesten, am höchsten,...) angegeben sind und der Bezug eindeutig zum Ballon gegeben ist (z.B. durch ein "als").

2.2.4 Relation zum umliegenden Stoff (1)

Definition: Es wird eine Relation zum umliegenden Stoff angegeben.

Ankerbeispiele:

- "Wasserstoff ist leichter als Luft." (E3_Prätest > S18: 4)

Kodierregeln:

Die Kategorie "Relation zum umliegenden Stoff" wird codiert, wenn...

16

Die Kategorie "ungenau" wird codiert, wenn... ... der Massenvergleich von Stoffen beschrieben, aber die Voraussetzung des gleichen Volumens nicht berücksichtigt wird.	Ankerbeispiele: "Eine Dichte, ist der Wert des Würfels in g pro cm³." (E3_Posttest > S15: 5) "es ist das Gewicht zwischen dem Kubikzentimeter(-würfel)" (E3_Posttest > S5: 4-5) Kodierregeln: Die Kategorie "ungenau" wird codiert, wenn... ... explizit der Würfel erwähnt wird, aber die Dichte nicht als Masse (oder alternative Bezeichnungen wie z.B.: Schwere, Gramm, Gewicht,...) dieses Würfels interpretiert wird. Die Kategorie wird ebenfalls codiert, wenn der Würfel explizit erwähnt wird, aber nicht auf die Masse eingegangen wird, wie z.B.: "Die Dichte ist von einem Würfel ein Würfel also 1 cm³" (E3_Follow-Up > S12: 3)
3.1.2 Masse von Stoffen verhältnismäßig vergleichen	
3.1.2.1 richtig (1) Definition: Die Dichte wird als Möglichkeit zum verhältnismäßigen Massenvergleich von Stoffen interpretiert.	Ankerbeispiele: "Mit der Dichte kann man bestimmen welcher Stoff verhältnismäßig schwerer ist." (E3_Posttest > S7: 4-5) Kodierregeln: Die Kategorie "richtig" wird codiert, wenn... ... der Massenvergleich von Stoffen beschrieben und dabei die Voraussetzung des gleichen Volumens berücksichtigt wird (z.B. durch "verhältnismäßig").
3.1.2.2 ungenau (0.5) Definition: Die Dichte wird als Möglichkeit zum Massenvergleich von Stoffen interpretiert.	Ankerbeispiele: "Dichte ist in jedem Stoff. Durch Dichte kann man auch herausfinden, welcher Stoff schwerer ist." (E3_Posttest > S14: 4) Kodierregeln:

Die Kategorie "ungenau" wird codiert, wenn... ... der Massenvergleich von Stoffen beschrieben, aber die Voraussetzung des gleichen Volumens nicht berücksichtigt wird.	Ankerbeispiele: "Dichte ist ein Gewicht pro Kubikzentimeter" (E3_Posttest > S2: 4) Kodierregeln: Die Kategorie "Masse pro Volumen" wird codiert, wenn... ... die Dichte als Masse (oder alternative Bezeichnungen wie z.B.: Schwere, Gramm, Gewicht,...) pro Volumen (meist in Kubikzentimeter) interpretiert wird.
3.1.3 Masse pro Volumen (1) Definition: Die Dichte wird als Masse pro Volumen interpretiert.	Ankerbeispiele: "Masse Volumen nanometer" (E1_Posttest > S4: 5) Kodierregeln: Die Kategorie "Masse und Volumen" wird codiert, wenn... ... sowohl die Masse, als auch das Volumen genannt werden, aber kein Zusammenhang zwischen den beiden Größen hergestellt wird.
3.1.4 Masse und Volumen (0.5) Definition: Die Dichte wird zwar mit Masse und Volumen in Verbindung gebracht, aber kein Zusammenhang zwischen den Größen hergestellt.	Ankerbeispiele: "Ich glaube das ist so ähnlich wie das Gewicht." (E2_Prätest > S12: 5) "Dichte hat was mit Gewicht zu tun also was schwerer ist, ist auch dichter." (E2_Posttest > S25: 5) Kodierregeln: Die Kategorie "Masse" wird codiert, wenn... ... nur Bezug zur Masse (oder Gramm, Gewicht,...), ohne das Volumen genommen wird.
3.1.5 Masse Definition: Die Dichte wird nur mit der Masse (ohne das Volumen) in Verbindung gebracht oder als solche interpretiert.	Ankerbeispiele: "Ich glaube das ist so ähnlich wie das Gewicht." (E2_Prätest > S12: 5) "Dichte hat was mit Gewicht zu tun also was schwerer ist, ist auch dichter." (E2_Posttest > S25: 5) Kodierregeln: Die Kategorie "Masse" wird codiert, wenn... ... nur Bezug zur Masse (oder Gramm, Gewicht,...), ohne das Volumen genommen wird.

- ... die Dichte synonym zur Masse betrachtet wird.

3.1.6 Volumen

Definition: Die Dichte wird nur mit dem Volumen (ohne Masse) in Verbindung gebracht oder als solches interpretiert.

Ankerbeispiele:

- "Dichte ist meine ich Volumen" (E1_Prätest > S2: 4)
- "Dichte ist was etwas schützt und stand hält. Es geht dabei auch um große" (E1_Prätest > S19: 5)

Kodierregeln:

Die Kategorie "Volumen" wird codiert, wenn...

- ... nur Bezug zum Volumen (oder Größe, Fläche, Breite, Umfang, ...) ohne die Masse genommen wird.
- ... die Dichte synonym zum Volumen betrachtet wird.

3.2 Stoffeigenschaft (1)

Definition: Die Dichte wird als eine Stoffeigenschaft interpretiert.

Ankerbeispiele:

- "Stoffe haben dichte" (E3_Follow-Up > S14: 4)

Kodierregeln:

Die Kategorie "Masse pro Volumen" wird codiert, wenn...

- ... die Dichte als Stoffeigenschaft bezeichnet wird.
- ... geschrieben wird, dass Stoffe eine unterschiedliche Dichte haben können.

3.3 Auftrieb

3.3.1 richtig (1)

Definition: Die Dichte wird als Maß für den Auftrieb interpretiert und es ist kein falscher Zusammenhang (hohe Dichte -> steigt auf, geringe Dichte -> sinkt) erkennbar.

Ankerbeispiele:

- "Durch die Dichte können Dinge sinken, schweben und steigen" (E3_Posttest > S6: 4-5)

20

Kodierregeln:

Die Kategorie "richtig" wird codiert, wenn...

- ... die Dichte zur Beschreibung für das Aufsteigen, Schweben oder Sinken verwendet wird und kein falscher Zusammenhang erkennbar ist.
- ... die Dichte zur Beschreibung für das Schwimmen und Sinken verwendet wird und kein falscher Zusammenhang erkennbar ist.

3.3.2 falscher Zusammenhang (0.5)

Definition: Die Dichte wird als Maß für den Auftrieb interpretiert und es ist ein falscher Zusammenhang (hohe Dichte -> steigt auf, geringe Dichte -> sinkt) erkennbar oder es wurde inhaltlich falsch formuliert.

Ankerbeispiele:

- "Materialien können unterschiedliche Dichten haben. Materialien mit hoher Dichte treiben z.B. oben." (E3_Prätest > S4: 5)

Kodierregeln:

Die Kategorie "falscher Zusammenhang" wird codiert, wenn...

- ... die Dichte zur Beschreibung für das Aufsteigen, Schweben oder Sinken verwendet wird und ein falscher Zusammenhang erkennbar ist oder inhaltlich falsch formuliert wurde.
- ... die Dichte zur Beschreibung für das Schwimmen und Sinken verwendet wird und ein falscher Zusammenhang erkennbar ist oder inhaltlich falsch formuliert wurde.

3.4 Formeln, Einheiten und Symbole

3.4.1 richtig (1)

Definition: Es werden richtige Formeln, Einheiten oder Symbole zur Dichte angegeben

Ankerbeispiele:

- " - kg/V
- gibt das Volumen an." (E3_Follow-Up > S19: 4-5)

Kodierregeln:

Die Kategorie "richtig" wird codiert, wenn...

- ... richtige Formeln, Einheiten oder Symbole zur Dichte angegeben werden. Statt mit der Kategorie "richtig" werden die Analyseseinheiten mit einer Subkategorie codiert, der jeweiligen Formel, Einheit oder dem jeweiligen Symbol entspricht.

21

der Kategorie "unkonkret" werden die Analyseeinheiten mit einer Subkategorie codiert, dem jeweiligen Begriff entspricht.

3.4.2.1 Formeln

3.4.1.1 Dichte = Masse(m)/Volumen(V)

3.4.1.2 p(Dichte) = g (gramm) / cm3 (Kubikzentimeter)

3.4.2.2 Einheit

3.4.1.3 Masse geteilt durch Volumen

3.4.1.4 m/V

3.4.1.5 m/V mit Würfeln erklärt

3.4.1.6 g/cm3

3.4.1.7 rho

3.4.2 unkonkret

Definition: Es werden keine konkreten Formeln, Einheiten oder Symbole zur Dichte angegeben.

Ankerbeispiele:

- "eine Einheit" (E3_Posttest > S25: 4)

Kodierregeln:

Die Kategorie "unkonkret" wird codiert, wenn...

- ... keine konkreten Formeln, Einheiten oder Symbole zur Dichte angegeben werden, sondern nur Begriffe, wie z.B. "Formeln" oder "Einheit" verwendet werden. Statt mit

Definition: Es werden falsche Formeln, Einheiten oder Symbole zur Dichte angegeben

Ankerbeispiele:

- "- Kg/V
- gibt das Volumen an." (E3_Follow-Up > S19: 4-5)

Kodierregeln:

Die Kategorie "falsch" wird codiert, wenn...

- ... falsche Formeln, Einheiten oder Symbole zur Dichte angegeben werden. Statt mit der Kategorie "falsch" werden die Analyseeinheiten mit einer Subkategorie codiert, dem jeweiligen Fehler entspricht.

3.4.3.1 Volumen*Masse

3.4.3.2 Kg/V (0.5)

3.4.3.3 Länge*Volumen

3.4.3.4 nanometer

3.4.3.5 Dichte wird in rho angegeben (0.5)

3.5 alternative Vorstellungen

Definition: Die Dichte wird mithilfe alternativer Vorstellungen beschrieben.

Ankerbeispiele:

- "Dichte ist wie viel oder wenig Luft ein Stoff enthält, manche enthalten mehr manche weniger. Wenn man einen Stoff hat und dieser kein Wasser oder Luft durchlässt." (E3_Prätest > S10: 5)

Kodierregel:

Die Kategorie "alternative Vorstellungen" wird codiert, wenn...

- ... wenn alternative Vorstellungen zur Beschreibung der Dichte verwendet werden. Statt mit dem Code "alternative Vorstellungen" werden die Segmente mit entsprechenden Subcodes codiert, die den Kern der jeweiligen Vorstellungen erfassen. Im Ankerbeispiel sind dies die Subcodes "Undurchlässigkeit (luft- oder wasserdicht)" sowie "Maß für enthaltene Luft". Lässt sich keine zugrundeliegende Vorstellung erkennen, wird das Segment mit dem Code "Sonstige Antworten" codiert.

3.5.1 Undurchlässigkeit (luft- oder wasserdicht)

3.5.2 Inneres eines Stoffes/Gegenstandes

3.5.3 Gedichte

3.5.4 Teilchennähe

3.5.5 Teilchen pro Volumen/Fläche

3.5.6 Enge/Nähe

3.5.7 kleine Teilchen

3.5.8 Festigkeit

3.5.9 Massivität

3.5.10 Härte

3.5.11 Dicke

3.5.12 Maß für enthaltene Luft

3.5.13 Löslichkeit

3.7 keine Antwort

Definition: Es wird keine Antwort gegeben.

Ankerbeispiele:

- "Ich habe es schon mal gehört, weiß aber nicht was es bedeutet." (E3_Prättest > S6:5)

Kodierregeln:

Die Kategorie "keine Antwort" wird codiert, wenn...

- ... nichts geschrieben wurde.
- ... kein inhaltlicher Beitrag zur Dichte geleistet wird.

Die Kategorie wird ebenfalls codiert, wenn die Antworten zirkulär sind, also die Dichte mit der Dichte selbst beschrieben wird z.B.:

- "Ich vermute das es bedeutet wie dicht ein Material oder Stoff ist." (E0_Prättest > S9:5)

4 4) kleines und großes Stück Eisen./Kupferdraht wird abgeschnitten. Inwiefern unterscheidet sich die Dichte?

Bei dieser Aufgabe wird die gesamte Analyseeinheit sowohl hinsichtlich ihrer Antwort, als auch hinsichtlich ihrer Begründung codiert. Bei der Begründung und der Antwort sind

Mehrfachcodierungen zugelassen.

4.1 Antwort

4.1.1 Dichte ist gleich (1)

Definition: Die Lernenden erkennen, dass die Dichte gleich bleibt.

Ankerbeispiele:

- "Garnicht!" (E3_Follow-Up > S4:6)

Kodierregeln:

Die Kategorie "Dichte ist gleich" wird codiert, wenn...

- ... die Lernenden angeben, dass sich die Dichte nicht unterscheidet.

3.5.14 Leitfähigkeit

3.5.15 Gesamtwert

3.5.16 Mengenangabe

3.5.17 Nebeldichte

3.5.18 Schutz und Beständigkeit

3.5.19 Schichten eines Gegenstandes

3.5.20 Oberflächenbeschaffenheit/-spannung

3.5.21 Fülle

3.5.22 Anteil

3.6 Sonstige Antworten

- ... die Lernenden angeben, dass die Dichte des kleineren Stücks größer ist.

4.1.3.3 unspezifisch

Definition: Die Lernenden geben an, dass sich die Dichte der beiden Stücke unterscheidet, aber nicht inwiefern.

Ankerbeispiele:

- "Das große Stück hat eine andere Dichte" (E3_Prätest > S4: 6)

Kodierregeln:

Die Kategorie "unspezifisch" wird codiert, wenn...

- ... die Lernenden angeben, dass sich die Dichte der beiden Stücke unterscheidet, aber nicht inwiefern.

Die Kategorie wird ebenfalls codiert, wenn nur eine Begründung angegeben wird, wie z.B.:

- "Durch das Gewicht." (E2_Prätest > S6: 6)

4.1.4 Masse unterscheidet sich

4.1.4.1 proportionale Volumen-Masse Beziehung

Definition: Die Lernenden geben an, dass das kleine Stück leichter ist.

Ankerbeispiele:

- "Das kleine ist leichter als das große." (E3_Posttest > S19: 5-6)

Kodierregeln:

Die Kategorie "proportionale Volumen-Masse Beziehung" wird codiert, wenn...

- ... die Lernenden angeben, dass das kleinere Stück schwerer ist.

4.1.4.2 antiproportionale Volumen-Masse-Beziehung

Definition: Die Lernenden geben an, dass das kleine Stück schwerer ist.

Ankerbeispiele:

- "Das kleinere Stück ist immer schwerer." (E3_Posttest > S21: 5)

Kodierregeln:

4.1.2 Dichte ist nur bei gleichem Volumen gleich (0.5)

Definition: Die Lernenden geben an, dass die Dichte nur bei gleichem Volumen gleich sein kann.

Ankerbeispiele:

- "Der Draht wird kleiner und somit auch die Dichte. Aber die Dichte auf 1cm³ nicht, nur die gesamte." (E3_Follow-Up > S6: 5)

Kodierregeln:

Die Kategorie "Dichte ist nur bei gleichem Volumen gleich" wird codiert, wenn...

- ... die Lernenden angeben, dass sich die Dichte nur bei gleichem Volumen gleich sein kann.

Wenn dieser Code vergeben wird, wird kein weiterer Code aus der Kategorie "Antwort" vergeben. Also im Falle des Ankerbeispiels wird nicht noch zusätzlich "proportionale Volumen-Dichte-Beziehung" codiert.

4.1.3 Dichte unterscheidet sich

4.1.3.1 proportionale Volumen-Dichte-Beziehung

Definition: Die Lernenden denken, dass sich die Dichte proportional zum Volumen verändert.

Ankerbeispiele:

- "Das große Stück ist mehr Dichte" (E3_Prätest > S23: 6)

Kodierregeln:

Die Kategorie "proportionale Volumen-Dichte-Beziehung" wird codiert, wenn...

- ... die Lernenden angeben, dass die Dichte des großen Stücks größer ist.
- ... die Lernenden angeben, dass die Dichte des kleineren Stücks kleiner ist.

4.1.3.2 antiproportionale Volumen-Dichte-Beziehung

Definition: Die Lernenden denken, dass sich die Dichte proportional zum Volumen verändert.

Ankerbeispiele:

- "Das große Stück ist mehr Dichte" (E3_Prätest > S23: 6)

Kodierregeln:

Die Kategorie "antiproportionale Volumen-Dichte-Beziehung" wird codiert, wenn...

- ... die Lernenden angeben, dass die Dichte des großen Stücks kleiner ist.

4.2 Begründung

Bei dieser Kategorie geht es nur um Begründungen zur Dichte. Das bedeutet, dass die Kategorie nur codiert wird, wenn die Antwort mit "Dichte ist gleich" oder mit einem Subcode von "Dichte unterscheidet sich" codiert wurden.

4.2.1 Masse pro Kubikzentimeter (1)

Definition: Die Lernenden begründen ihre Antwort damit, dass die Dichte die Masse pro Kubikzentimeter angibt.

Ankerbeispiele:

- "Sie unterscheidet sich nicht, da die Masse pro cm3 gleich bleibt." (E3_Posttest > S18: 8)

Kodierregeln:

Die Kategorie "Masse pro Kubikzentimeter" wird codiert, wenn...

- ... die Lernenden angeben, dass die Masse pro Kubikzentimeter gleich bleibt.
- ... die Lernenden sich explizit auf einen Kubikzentimeter beziehen.

4.2.2 auf gleiche Größe bringen (1)

Definition: Die Lernenden begründen ihre Antwort mit dem angleichen der Volumina beider Stücke.

Ankerbeispiele:

- "Die dichte ist gleich, da wenn man das große Stück Eisen kleiner macht und es die gleiche Größe wie das kleine Stück hat, kann man sie vergleichen." (E3_Posttest > S10: 5)

Kodierregeln:

Die Kategorie "auf gleiche Größe bringen" wird codiert, wenn...

- ... die Lernenden beide Stücke auf die gleiche Größe bringen möchten.

Die Kategorie wird nicht codiert, wenn die gleiche Größe 1 cm3 beträgt, wie z.B.:

- "Die Dichte bleibt gleich, da das Kupfer ja immer noch gleich viel wiegt wenn man in die Größe eines cm3 bringt." (E3_Follow-Up > S3: 5)

4.2.3 Stoff (1)

Definition: Die Lernenden begründen ihre Antwort damit, dass der Stoff bei beiden Stücken gleich bleibt.

Die Kategorie "antiproportionale Volumen-Masse-Beziehung" wird codiert, wenn...

- ... die Lernenden angeben, dass das kleinere Stück schwerer ist.

4.1.4.3 unspezifisch

Definition: Die Lernenden geben an, dass sich die Masse der beiden Stücke unterscheidet, aber nicht inwiefern.

Ankerbeispiele:

- "Das große Stück hat eine andere Dichte" (E3_Prätest > S4: 6)

Kodierregeln:

Die Kategorie "unspezifisch" wird codiert, wenn...

- ... die Lernenden angeben, dass sich die Masse der beiden Stücke unterscheidet, aber nicht inwiefern.

4.1.5 Volumen unterscheidet sich

Definition: Die Lernenden geben an, dass sich die das Volumen der beiden Stücke ändert.

Ankerbeispiele:

- "Ein Stück ist größer" (E3_Prätest > S1: 6)

Kodierregeln:

Die Kategorie "Volumen unterscheidet sich" wird codiert, wenn...

- ... die Lernenden angeben, dass sich das Volumen der beiden Stücke unterscheidet.
- ... die Lernenden angeben, dass ein Stück größer ist.

4.1.6 keine Antwort

4.1.7 Sonstige Antworten

4.2.7 keine Begründung

Definition: Die Lernenden geben keine Begründung für ihre Antwort an.

Ankerbeispiele:

- "Die stücke haben die gleiche dichte. Nur das Gewicht ändert sich wegen der Masse."
(E2_Posttest > S18: 6)
- "Garnicht, die Dichte bleibt gleich, egal wie viel Masse oder Volumen." (E0_Posttest > S4: 6)

Kodierregeln:

Die Kategorie "keine Begründung" wird codiert, wenn...

- ... keine Begründung angegeben wird.

Die Kategorie wird nicht codiert, wenn die Analyseseinheit bereits mit der Kategorie "keine Antwort" codiert wurde.

5 5) Die Dichte von Schwefel beträgt 2 g/cm³/von Natrium beträgt 0,97 g/cm³. Was bedeutet dieser Wert für dich?

Bei dieser Aufgabe können Mehrfachcodierungen auftreten.

Beispiel: "2 g und 2 cm³. Die Dichte wurde komplett ausgefüllt" (E2_Prätest > S16: 7)

Diese Antwort wird mit der Subkategorie "1 g pro cm³ oder 2 g pro 2 cm³" und der Kategorie "Sonstige Antworten" codiert.

5.1 Relation zu Masse und Volumen

5.1.1 Masse pro Kubikzentimeter(-Würfel)

5.1.1.1 richtig (1)

Definition: Der Wert der angegebenen Dichte wird als Masse eines Kubikzentimeterwürfels interpretiert und inhaltlich richtig formuliert.

33

Ankerbeispiele:

- "Garnicht, da die Dichte von einem Stoff innen gleich ist" (E3_Posttest > S12: 5)

Kodierregeln:

Die Kategorie "Stoff" wird codiert, wenn...

- ... die Lernenden sich in ihrer Begründung mit dem Gleichbleiben des Stoffes argumentieren.

Die Kategorie wird nicht codiert, wenn zwar der Stoff genannt, aber durch Begriffe wie z.B. "mehr" auf das Volumen eingegangen wird, z.B.:

- "Nein, weil die Dichte wird nicht dichter wenn es mer Eisen gibt." (E3_Prätest > S15: 6)

4.2.4 Masse

Definition: Die Lernenden begründen ihre Antwort mit der Masse der Stücke.

Ankerbeispiele:

- "Da ein kleines Stück leichter ist ist die Dichte nicht so groß" (E3_Prätest > S20: 6)

Kodierregeln:

Die Kategorie "Masse" wird codiert, wenn...

- ... die Lernenden ihre Antwort mit der Masse der Stücke begründen.

4.2.5 Volumen

Definition: Die Lernenden begründen ihre Antwort mit dem Volumen der Stücke.

Ankerbeispiele:

- "Die Dichte verändert sich nicht, da es nicht auf die Größe des Stückes ankommt.?" (E3_Follow-Up > S11: 6)

Kodierregeln:

Die Kategorie "Volumen" wird codiert, wenn...

- ... die Lernenden ihre Antwort mit dem Volumen der Stücke begründen. Dazu werden auch Begriffe wie z.B. Größe, Dicke, Flächeninhalt oder Fläche gezählt.

4.2.6 Sonstige Begründungen

Die Kategorie wird nicht codiert, wenn der Wert inklusive Einheit wie in der Aufgabenstellung übernommen wird, z.B.:

- "Das die Zwischenräume als Teilchenmodell klein sind. 0.97 g/cm3" (E0_Prätest > S4: 7)

5.1.2.2 ungenau (0.5)

Definition: Die Masse pro Kubikzentimeter wird ungenau formuliert.

Ankerbeispiele:

- "Dass Natrium eine Dichte von 0.97 g pro Quadratzentimeter hat." (E0_Posttest > S1: 7)
- "Ich glaube das bedeutet, dass pro cm3 die Dichte 2g wiegt" (E2_Prätest > S10: 7)
- "Dass das Natrium 0.97 gramm in Kubikzentimeter hat und das Natrium eine dichte von 0.97 gramm hat" (E0_Posttest > S12: 7)

Kodierregeln:

Die Kategorie "ungenau" wird codiert, wenn...

- ... die Einheiten (häufig vom Volumen) falsch formuliert werden.
- ... unpassende Kombinationen von Größen, Einheiten und Verben verwendet werden.
- ... statt "pro" die Präposition "in" verwendet wird ("auf" wird aber als richtig gewertet).

5.1.2.3 Wert=Masse=Volumen

Definition: Der Wert der angegebenen Dichte wird sowohl als Masse, als auch als Volumen interpretiert.

Ankerbeispiele:

- "Es bedeutet das 1 g ein cm3 ist." (E3_Posttest > S17: 6)
- "Das pro 2 cm3 auch 2 g drauf kommen" (E2_Prätest > S7: 7)

Kodierregeln:

Die Kategorie "Wert=Masse=Volumen" wird codiert, wenn...

- ... der Wert der angegebenen Dichte sowohl als Masse, als auch als Volumen interpretiert wird.

Dieser wird auch codiert, wenn zusätzlich die Einheiten oder die Formulierungen falsch sind, z.B.:

- "Er wiegt zwei Gramm und ist 2 cm groß." (E2_Prätest > S5: 7)

5.1.3 Masse und Volumen (0.5)

Definition: Der angegebene Wert der Dichte wird mit Masse und Volumen in Verbindung gebracht, aber es werden keine konkreten Werte genannt.

Ankerbeispiele:

- "Schwefel wiegt 2 g pro Kubikzentimeter(-würfel)." (E3_Posttest > S7: 7)

Kodierregeln:

Die Kategorie "richtig" wird codiert, wenn...

- ... explizit der Würfel erwähnt wird und der Wert der Dichteangabe als Masse (oder alternative Bezeichnungen wie z.B.: Schwere, Gramm, Gewicht,...) dieses Würfels interpretiert wird.

5.1.1.2 ungenau (0.5)

Definition: Der Wert der angegebenen Dichte wird als Masse eines Kubikzentimeterwürfels interpretiert, aber inhaltlich ungenau formuliert.

Ankerbeispiele:

- "Für mich bedeutet das, dass dieses Wert (0.97 g) ein Würfel ist." (E3_Follow-Up > S15: 6)

Kodierregeln:

Die Kategorie "ungenau" wird codiert, wenn...

- ... explizit der Würfel erwähnt wird, aber der Wert der Dichteangabe nicht als Masse (oder alternative Bezeichnungen wie z.B.: Schwere, Gramm, Gewicht,...) dieses Würfels interpretiert wird.

5.1.2 Masse pro Kubikzentimeter

5.1.2.1 richtig (1)

Definition: Der Wert der angegebenen Dichte wird als Masse pro Kubikzentimeter interpretiert.

Ankerbeispiele:

- "Schwefel wiegt 2 g pro cm3." (E3_Prätest > S18: 7)
- "Schwefel hat eine Dichte von 2 g pro cm3" (E3_Prätest > S4: 7)

Kodierregeln:

Die Kategorie "richtig" wird codiert, wenn...

- ... der Wert der angegebenen Dichte (2 oder 0.97) als Masse (oder alternative Bezeichnungen wie z.B.: Schwere, Gramm, Gewicht,...) pro Kubikzentimeter interpretiert wird.

Ankerbeispiele:

- "Das bedeutet für mich, dass (...)g pro cm³ beträgt" (E3_Prätest > S15: 7)
- "Dieser Wert zeigt, dass die Dichte von der Masse (g) und von dem Volumen abhängt." (E0_Prätest > S21: 8)

Kodierregeln:

Die Kategorie "Masse und Volumen" wird codiert, wenn...

- ...der angegebenen Wert der Dichte mit der Masse (oder g) und dem Volumen (oder cm³) in Verbindung gebracht wird, aber keine konkreten Werte genannt werden.

5.1.4 Masse oder Volumen

Definition: Der Wert der angegebenen Dichte wird entweder als Masse oder als Volumen interpretiert.

Ankerbeispiele:

- "Ich glaube das dieser Wert 2 g bedeutet" (E2_Prätest > S22: 6)

Kodierregeln:

Die Kategorie "Masse oder Volumen" wird codiert, wenn...

- ... aus dem angegebenen Wert der Dichte nur auf eine Größe (Masse oder Volumen) geschlossen wird.

5.2 Auftrieb**5.2.1 Auftrieb in der Luft****5.2.1.1 richtig (1)**

Definition: Der Wert der angegebenen Dichte wird als Maß für den Auftrieb in der Luft interpretiert und auf ein Sinken des Stoffes geschlossen.

Ankerbeispiele:

- "Schwefel steigt in Luft nicht auf (sinkt)" (E3_Posttest > S18: 9-10)

Kodierregeln:

Die Kategorie "richtig" wird codiert, wenn...

- ... aus dem angegebenen Wert der Dichte auf ein Sinken oder nicht Aufsteigen des Stoffes in der Luft geschlossen wird.

36

5.2.1.2 falsch (0-5)

Definition: Der Wert der angegebenen Dichte wird als Maß für den Auftrieb in der Luft interpretiert und auf ein Aufsteigen des Stoffes geschlossen.

Ankerbeispiele:

- "Natrium schwimmt im Wasser und fliegt in der Luft. Außerdem wiegt ein cm³ 0,97 g." (E3_Follow-Up > S3: 6)

Kodierregeln:

Die Kategorie "falsch" wird codiert, wenn...

- ... aus dem angegebenen Wert der Dichte auf ein Aufsteigen des Stoffes in der Luft geschlossen wird.

5.2.2 Auftrieb in Wasser (1)

Definition: Der Wert der angegebenen Dichte wird als Maß für den Auftrieb in Wasser interpretiert und auf ein Sinken von Schwefel bzw. ein Schwimmen von Natrium geschlossen.

Ankerbeispiele:

- "Schwefel würde im Wasser untergehen, da die Dichte größer ist." (E3_Posttest > S9: 8)

Kodierregeln:

Die Kategorie "richtig" wird codiert, wenn...

- ... aus dem angegebenen Wert der Dichte auf ein Sinken (bei Schwefel) oder Schwimmen (bei Natrium) in Wasser geschlossen wird.

5.3 Teilchennähe

Definition: Der Wert der angegebenen Dichte wird als Maß für die Nähe der Teilchen interpretiert.

Ankerbeispiele:

- "Das bedeutet, dass die Teilchen so nah aneinander sind." (E0_Prätest > S13: 7)

Kodierregeln:

Die Kategorie "Teilchennähe" wird codiert, wenn...

- ... aus dem angegebenen Wert der Dichte auf die Teilchennähe oder die Größe der Zwischenräume geschlossen wird.

37

5.4.3 falsch

Definition: Es wird eine falsche Rechnung angegeben.

Ankerbeispiele:

- "Ich muss das in Masse umrechnen" (E2_Posttest > S23: 6)
- "gcm" (E3_Follow-Up > S25: 6)

Kodierregeln:

Die Kategorie "falsch" wird codiert, wenn...

- ... der angegebene Wert der Dichte zwar mit "rechnen" oder mit einer Rechnung in Verbindung gebracht, aber eine falsche Rechnung angegeben wird.
- ... statt "Masse geteilt durch Volumen" falsche Einheiten (z.B. cm) oder Größen (z.B. Länge) angegeben werden.

5.5 Dichte

Definition: Der Wert der angegebenen Dichte wird als Dichte interpretiert.

Ankerbeispiele:

- "Der Wert ist die Dichte eines Stoffes" (E2_Posttest > S6: 7)

Kodierregeln:

Die Kategorie "Dichte" wird codiert, wenn...

- ... der Wert (ohne Nennung oder nur als Zahl ohne Einheit) der angegebenen Dichte als Dichte interpretiert wird.
- ... anhand des Wertes die Dichte als hoch oder niedrig eingeschätzt wird.

Die Kategorie wird nicht codiert, wenn zusätzlich der angegebene Wert als Masse pro Kubikzentimeter angegeben wird, z.B.:

- "Die Dichte von Aluminium beträgt pro cm³ 0,97 Gramm" (E1_Posttest > S9: 9)
- Statt dessen werden die Subkategorien der Kategorie "Masse pro Kubikzentimeter" codiert.

5.6 Sonstige Antworten

5.7 keine Antwort

Definition: Es wird keine Antwort gegeben.

Ankerbeispiele:

- "weiß nicht, wie ich das erklären soll leider." (E3_Posttest > S26: 6)

5.4 Rechnung

Definition: Der Wert der angegebenen Dichte wird als eine Rechnung interpretiert.

Ankerbeispiele:

- "Es gibt zwei ganze und man muss Gramm(g) und cm hoch drei zusammen geteilt rechnen." (E3_Prätest > S16: 7)
- "Gramm geteilt durch Volumen" (E1_Posttest > S8: 7)

Kodierregeln:

Die Kategorie "Rechnung" wird codiert, wenn...

- ... der angegebene Wert als eine Rechnung interpretiert wird, indem Wörter wie z.B. rechnen, Ergebnis, teilen oder geteilt (auch als Symbol "/") verwendet werden. Statt mit der Kategorie "Rechnung" werden die Segmente mit einer der drei Subkategorien codiert.

5.4.1 richtig (1)

Definition: Als Rechnung wird "Masse geteilt durch Volumen" angegeben.

Ankerbeispiele:

- "Es gibt zwei ganze und man muss Gramm(g) und cm hoch drei zusammen geteilt rechnen." (E3_Prätest > S16: 7)
- "Gramm geteilt durch Volumen" (E1_Posttest > S8: 7)

Kodierregeln:

Die Kategorie "richtig" wird codiert, wenn...

- ... als Rechnung "Masse (oder Gramm, Gewicht, g, ...) geteilt durch Volumen (oder cm³, Größe)" angegeben wird.

5.4.2 unkongruent

Definition: Es wird keine konkrete Rechnung angegeben.

Ankerbeispiele:

- "So berechnet man die Dichte." (E0_Posttest > S18: 7)

Kodierregeln:

Die Kategorie "unkongruent" wird codiert, wenn...

- ... der angegebene Wert der Dichte zwar mit "rechnen" oder mit einer Rechnung in Verbindung gebracht, aber keine konkrete Rechnung genannt wird.

Kodierregeln:
Die Kategorie "keine Antwort" wird codiert, wenn...

- ... nichts geschrieben wurde.
- ... keine Interpretation des Wertes vorgenommen wird.

D Erhebungs- und Auswertungsinstrumente

D.1 Interviewleitfaden

Hinweis: Der Interviewleitfaden basiert auf dem von Peitz (2022) im Rahmen ihrer Masterarbeit erstellten Leitfaden und wurde für die Dokumentation in dieser Arbeit redaktionell überarbeitet (u.a. sprachliche Korrekturen und klare Zuordnung von Abbildungen zu den entsprechenden Fragen)

Interviewleitfaden

Sondierungsfragen

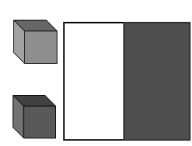
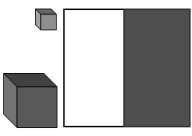
- Wie alt bist du?
- Magst du Mathematik?
- Was sind deine Noten in Mathematik und Chemie?

Fragen zur Auftriebsvorstellung

1. Könntest du für jeden der beiden Würfel eine Vermutung aufstellen, ob der Würfel schwimmt oder sinkt? (Abbildung 1)
2. Könntest du für jeden der beiden Würfel eine Vermutung aufstellen, ob der Würfel schwimmt oder sinkt? (Abbildung 2)
3. Warum fliegt ein mit Helium gefüllter Ballon in der Luft?
4. Kommen wir zurück zum Chemieunterricht. Was fällt dir zum Thema Dichte ein?

Fragen zur Würfelvorstellung

5. Wie würdest du im Chemieunterricht die Dichte von diesem Würfel bestimmen? (Gegenstands-Impuls)
6. Die Dichte von Aluminium ist $\rho = 2,74 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$. Was bedeutet dieser Wert für dich? (Abbildung 7)
7. Wir haben zwei gleichgroße Würfel A und B mit $\rho_A = 2 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ und $\rho_B = 4 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$. Woran kannst du den Dichteunterschied bei den Würfeln erkennen? (Abbildung 8)
8. Wir haben zwei gleichschwere Würfel A und B mit $\rho_A = 2 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ und $\rho_B = 4 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$. Woran kannst du den Dichteunterschied bei den Würfeln erkennen? (Abbildung 9)
9. Hat ein großes Stück Eisen die gleiche Dichte wie ein kleines Stück Eisen? (Abbildung 10)
10. Unterscheiden sich gasförmiges und flüssiges Wasser bezogen auf die Dichte?

Abbildung 1 Eichenholz: $m = 0,675\text{ g}$ $V = 1\text{ cm}^3$ Aluminium: $m = 2,700\text{ g}$ $V = 1\text{ cm}^3$ 	Abbildung 2 Eichenholz: $m = 1,35\text{ g}$ $V = 2\text{ cm}^3$ Aluminium: $m = 1,35\text{ g}$ $V = 0,5\text{ cm}^3$ 

Fragen zur Teilchenvorstellung

Hinweis: Die folgenden Fragen sind auf der Teilchenebene

11. Wie unterscheiden sich die Dichte von Wasser bei unterschiedlichen Aggregatzuständen? Kannst du das mit dem Teilchenmodell begründen und aufzeichnen?
12. Aluminium ist weniger dicht als Eisen. Wie stellst du dir das auf der Teilchenebene vor? Kannst du das bitte aufzeichnen?
13. Vergleiche die die Teilchendarstellungen. In welcher Darstellung ist die Dichte größer? (Abbildungen 3-6)

Fragen zur Umrechnungsvorstellung

14. Stell dir vor du willst einen Kuchen backen. Du brauchst 50 cm^3 Honig, hast aber den Messbecher verloren. Du weißt, dass Honig eine Dichte von $\rho_{\text{Ho}} = 1,5\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ hat. Eine Küchenwaage hast du auch. Was machst du? (Abbildung 11)
15. Die Küchenwaage ist leider kaputt gegangen aber der Messbecher ist wieder da. Du möchtest 50 g Mehl hinzufügen. Mehl hat eine Dichte $\rho_{\text{Me}} = 0,5\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$. Wie viel musst du abmessen? (Abbildung 12)
16. Berechne die Masse eines 90 cm^3 großen Quaders mit einer Dichte von $\rho = 4,5\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$. (Abbildung 13)
17. Berechne das Volumen eines Quaders mit einer Masse von 90 g und einer Dichte von $\rho = 1,5\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$. (Abbildung 14)

Abschluss

- Hast du noch etwas zum Hinzufügen?
- Bedanken für das Interview

Abbildung 6

Abbildung 3

Abbildung 7

Die Dichte von Aluminium ist $2,74 \frac{g}{cm^3}$.

Abbildung 8

Würfel A und B mit $\rho_A = 2 \frac{g}{cm^3}$ und $\rho_B = 4 \frac{g}{cm^3}$

Abbildung 9

Zwei gleichschwere
Würfel A und B mit $\rho_A = 2 \frac{g}{cm^3}$
und $\rho_B = 4 \frac{g}{cm^3}$

Abbildung 4

□ - Teilchen haben weniger Masse als ■ - Teilchen

Abbildung 5

Abbildung 10

Abbildung 11 Du brauchst 50 cm³ Honig. Honig hat eine Dichte von $\rho = 1,5 \frac{g}{cm^3}$. Eine Küchenwaage hast du.	Abbildung 12 Du brauchst 50 g Mehl. Mehl hat eine Dichte von $\rho = 0,5 \frac{g}{cm^3}$. Du hast einen Messbecher.
Abbildung 13 Berechne die Masse eines 90 cm³ großen Quaders und mit einer Dichte von $\rho = 4,5 \frac{g}{cm^3}$. 	Abbildung 14 Berechne das Volumen eines Quaders mit einem Gewicht von 90 g und einer Dichte von $\rho = 1,5 \frac{g}{cm^3}$. 

Abbildung 15 $Dichte = \frac{Masse}{Volumen}$	Abbildung 16 $\left[\frac{g}{cm^3} \right] = \frac{\left[\right] g}{\left[\right] cm^3}$

D.2 Prä-Post-Test

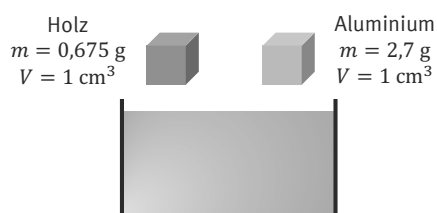


Prä-Test zum Unterrichtsvorhaben im Rahmen des Promotionsprojekts ma_Gic

Schule: _____ Klasse: _____ Datum: _____
 Name: _____ Alter: _____ Geschlecht: ☐ m ☐ w ☐ d

Lies dir die Aufgaben sorgfältig durch und **beantworte** sie so gut wie möglich.
 Manche Aufgaben kannst du vermutlich noch nicht beantworten. Das ist nicht schlimm!
 Deine Antworten werden vertraulich behandelt und haben keinen Einfluss auf deine Note!

1) Welcher der Würfel schwimmt in Wasser? **Kreuze** an und **begründe** deine Vermutung!



- ☐ Holzwürfel ☐ Aluminiumwürfel
☐ kein Würfel ☐ beide Würfel

Begründung:

2) Ein mit Wasserstoff gefüllter Ballon steigt in der Luft nach oben. Wie erklärst du dir diese Beobachtung? **Schreibe** auf!

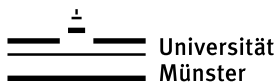


3) Hast du schon mal den Begriff „Dichte“ gehört? **Schreibe** alles auf, was du über die Dichte weißt!

4) Du hast ein kleines und ein großes Stück Eisen. Inwiefern unterscheidet sich die Dichte der beiden Stücke? **Begründe!**

5) Die Dichte von Schwefel beträgt $2 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$. Was bedeutet dieser Wert für dich? **Schreibe** auf!

D.3 Fragebogen



Evaluationsbogen

Bitte kreuze jeweils die Option an, die deiner Meinung am besten entspricht. Denke daran, es gibt keine richtigen oder falschen Antworten und deine Antworten werden anonymisiert.

Aussage	 Ich stimme überhaupt nicht zu	 Ich stimme nicht zu	 Ich bin neutral	 Ich stimme zu	 Ich stimme völlig zu	Kann ich nicht sagen
Die Arbeitsblätter waren übersichtlich.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Auf den Arbeitsblättern konnte man sich gut zurecht finden.	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Die Experimente haben Spaß gemacht.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Es war überraschend, dass das kleine und leichte Stück Bounty untergeht.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Die Darstellung der Versuchsschritte als Bilder war hilfreich.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Das Abhaken der Versuchsschritte war hilfreich.	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Die Simulationen haben Spaß gemacht.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Die Schieberegler bei der Simulation zum „Aufsteigen, Schweben und Sinken“ waren überfordernd.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Die Tipps während der Simulation zum „Aufsteigen, Schweben und Sinken“ waren hilfreich.	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Bei den Aufgaben war klar, was zu tun ist.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Die Aufgaben waren schwierig.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Die Aufgaben haben Spaß gemacht.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Durch die Überschriften der Aufgaben wusste man, was einen in der Aufgabe erwartet.	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Aussage	 Ich stimme überhaupt nicht zu	 Ich stimme nicht zu	 Ich bin neutral	 Ich stimme zu	 Ich stimme völlig zu	Kann ich nicht sagen
Es musste nur wenig geschrieben werden.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Die häufige Partnerarbeit war hilfreich.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Die Besprechungen in der gesamten Klasse waren hilfreich.	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Es ist leicht, sich die Dichte als Masse von einem Kubikzentimeterwürfel vorzustellen.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Nach der Stunde ist verständlich, was mit der „Würfelvorstellung“ gemeint ist.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Die „Würfelvorstellung“ hat einen bei manchen Aufgaben unterstützt.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Nach der Stunde ist verständlich, was mit der „Auftriebsvorstellung“ gemeint ist.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Die „Auftriebsvorstellung“ hat einen bei manchen Aufgaben unterstützt.	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Das Jahrmarktbild hat geholfen, einen Überblick über die Vorstellungen zur Dichte zu gewinnen.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Das Jahrmarktbild und die Fragen haben eine gute Orientierung für den Stundenverlauf gegeben.	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Die Merkzettel machen deutlich, was besonders wichtig ist.	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Das hat mir besonders gefallen:	
Das könnte verbessert werden:	

D.4 Musterlösung und Punktesystem (Artefakte)

D.4.1 Würfelvorstellung

Aufgabe 1: „schwere“ Stoffe

- a) *Das Lakritzbonbon (1 P.) besteht aus dem schwersten Stoff. [alternativ: Lakritz (1 P.)]*
- b) *Nickel ist der „schwerste“ Stoff (1 P.).*

Aufgabe 3: Masse von Stoffen verhältnismäßig vergleichen

- a) *Die Dichte ist eine Stoffeigenschaft (1 P.).*
Sie gibt an, wie viel ein Kubikzentimeter(-Würfel) (1 P.) eines Stoffes wiegt. [alternativ: cm^3 (1 P.), Kubikzentimeter (1 P.)]
Ein Kubikzentimeter(-Würfel) Gummi wiegt (1 P.) 0,95 Gramm. [alternativ: hat (0,5 P.), beträgt (0,5 P.)]
Die Dichte von Gummi beträgt 0,95 Gramm (1 P.) pro Kubikzentimeter(-Würfel) (1 P.). [alternativ: g (1 P.) bzw. cm^3 (1 P.), Kubikzentimeter (1 P.)]
 ρ = Dichte (1 P.)
g = Gramm (1 P.)
 cm^3 = Kubikzentimeter(-Würfel) (1 P.) [alternativ: Kubikzentimeter (1 P.)]
- b) *Die Gummikugel ist schwerer (1 P.) als die Goldkugel, weil sie viel mehr Volumen hat.*
Trotzdem ist Gold dichter als Gummi, weil ein Kubikzentimeter(-Würfel) Gold schwerer als ein Kubikzentimeter(-Würfel) Gummi ist (1 P.) [alternativ: weitere Formulierung, die erkennen lassen, dass das gleiche Volumen betrachtet werden muss (1 P.), wenn sich auf das gleiche Volumen bezogen wird, aber Dichte und Masse miteinander vertauscht werden (0,5 P.), wenn von „verhältnismäßig schwerer“ gesprochen wird (0,5 P.)]

Aufgabe 4: Die Dichte bestimmen

$V = 2 \text{ cm}^3$ und $m = 18 \text{ g}$ bedeuten, dass 2 (1 P.) Kubikzentimeter(-Würfel) 18 g wiegen (1 P.) [alternativ: sind (0,5 P.)]
Wenn man die 18 g gleichmäßig auf die 2 Kubikzentimeter(-Würfel) verteilt, bekommt jeder Würfel 9 (1 P.) g ab.

Die Dichte von Nickel beträgt somit 9 (1 P.) $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$.

Dafür musste ich $18 \text{ g} : 2 \text{ cm}^3$ (1 P.) rechnen.

Die Formel für die Dichte lautet deshalb auch: $\rho = \frac{V}{m}$ (1 P.)

Merkzettel: Bestimmung und Formel der Dichte!

Um die Dichte zu bestimmen, muss man die *Masse* (1 P.) eines Stoffes [alternativ: *Gramm* (0,5 P.)] durch die Anzahl der *Kubikzentimeter* (1 P.) (-Würfel) teilen. [alternativ: cm^3 (1 P.)]

$\text{Dichte} = \frac{\text{Masse}(1\text{P.})}{\text{Volumen}}$ [alternativ: *Masse (Gramm)* (1 P.), *Gewicht* (0,5 P.)]

$\rho = \frac{m}{V(1\text{P.})}$ [alternativ: cm^3 (1 P.)]

Merkzettel: So schreibt und liest man die Dichte!

ρ = *Dichte* (1 P.)

g = *Gramm* (1 P.) [alternativ: *Masse/Gramm* (1 P.), *Masse* (0,5 P.)]

cm^3 = *Kubikzentimeter* (1 P.) [alternativ: *Kubikzentimeter(-Würfel)* (1 P.)]

Die Dichte von Wasser beträgt 1 *Gramm* (1 P.) pro *Kubikzentimeter* (1 P.).
[alternativ: g (1 P.) bzw. cm^3 (1 P.), 1 *Kubikzentimeter* (1 P.)]

Ein Kubikzentimeter(-Würfel) Wasser wiegt 1 (1 P.) Gramm.

Waage: 1 (1 P.) g

Aufgabe 5: Die Dichte bestimmen

i) = 4 (1 P.) $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ [alternativ: richtiges Ergebnis, aber falsch notiert (0,5 P.)]

ii) 20 g (1 P.) werden gleichmäßig auf 4 (1 P.) Kubikzentimeter(-Würfel) verteilt. [alternativ: 20 (0,5 P.)]

$\rho = \frac{20 \text{ g}}{4 \text{ cm}^3} (1\text{P.})$ [alternativ: richtige Werte, aber keine Einheiten (1 P.)]

= 5 (1 P.) $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ [alternativ: richtiges Ergebnis, aber falsch notiert (0,5 P.)]

iii)

54 g (1 P.) werden gleichmäßig auf 6 (1 P.) Kubikzentimeter(-Würfel) verteilt. [alternativ: 54 (0,5 P.), 6 cm^3 (0,5 P.)]

$\rho = \frac{54 \text{ g}}{6 \text{ cm}^3} (1\text{P.})$ [alternativ: richtige Werte, aber keine Einheiten (1 P.)]

= 9 (1 P.) $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ [alternativ: richtiges Ergebnis, aber falsch notiert (0,5 P.)]

iv)

9 g (1 P.) werden gleichmäßig auf 10 (1 P.) Kubikzentimeter(-Würfel) verteilt. [alternativ: 9 (0,5 P.), 10 cm^3 (0,5 P.)]

$$\rho = \frac{9\text{ g}}{10\text{ cm}^3} (1P.) \text{ [alternativ: richtige Werte, aber keine Einheiten (1 P.)]} \\ = 0,9 (1 P.) \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \text{ [alternativ: richtiges Ergebnis, aber falsch notiert (0,5 P.)]}$$

Aufgabe 6: Die Dichte als Stoffeigenschaft

- b) Die Dichte ist unabhängig von dem Volumen eines Stoffes, da ein Kubikzentimeter(-Würfel) eines Stoffes immer gleich viel wiegt. (1 P.) [alternativ: weitere Formulierungen, die erkennen lassen, dass sich die Dichte auf ein bestimmtes Volumen bezieht (1 P.)]

Aufgabe 7: Zusammenhang zwischen Dichte, Masse und Volumen

- a) Vergrößert man nur das Volumen, muss die gleiche Masse auf *mehr* (1 P.) Kubikzentimeter(-Würfel) verteilt werden. Deshalb bekommt jeder Kubikzentimeter(-Würfel) *weniger* (1 P.) Masse ab. Die Dichte *nimmt ab* (1 P.).
Vergrößert man nur die Masse, muss mehr Masse auf *gleich viele* (1 P.) Kubikzentimeter(-Würfel) verteilt werden. Deshalb bekommt jeder Kubikzentimeter(-Würfel) *mehr* (1 P.) Masse ab. Die Dichte *nimmt zu* (1 P.).
- b) Die Dichte von D, F, G ist größer als die Dichte von A.
Die Dichte von B, C ist kleiner als die Dichte von A.
Die Dichte von E ist genauso groß wie die Dichte von A
Für jeden richtigen Buchstaben 1 P., für jeden weiteren falschen Buchstaben -1 P.

D.4.2 Auftriebsvorstellung

Aufgabe 3: Aufsteigen, Schweben und Sinken

- a) Man muss die Dichte (ρ) (1 P.) verändern.
- b) Ist die Dichte (1 P.) von dem blauen Gegenstand oder Stoff *kleiner* (1 P.) als die Dichte (1 P.) von dem grauen Würfel, steigt der blaue Gegenstand oder Stoff auf. [alternativ: Dichte Masse (0,5 P.), Masse (Dichte) (0,5 P.), *geringer* (1 P.), *leichter* (0,5 P.)]
Ist die Dichte (1 P.) von dem blauen Gegenstand oder Stoff *gleich* (1 P.) wie die Dichte (1 P.) von dem grauen Würfel, schwebt der blaue Gegenstand

oder Stoff. [alternativ: *Masse Dichte (0,5 P.)*, *gleich schwer (0,5 P.)*, *ähnlich (0,5 P.)*]

Ist die *Dichte (1 P.)* von dem blauen Gegenstand oder Stoff *größer (1 P.)* als die *Dichte (1 P.)* von dem grauen Würfel, sinkt der blaue Gegenstand oder Stoff. [alternativ: *Dichte Masse (0,5 P.)*, *schwerer (0,5 P.)*]

- c) *Regeln gelten auch in gasförmigen Stoffen (1 P.)* [alternativ: nur manche Regeln gelten (0,5 P.)]

Merkzettel

Ein Stoff oder Gegenstand *sinkt (1 P.)*, wenn seine Dichte *größer (1 P.)* ist, als die Dichte von dem umliegenden Stoff. [alternativ: *schwerer (0,5 P.)*, *dichter (0,5 P.)*, *mehr (0,5 P.)*]

Ein Stoff oder Gegenstand *schwebt (1 P.)*, wenn seine Dichte *gleich (1 P.)* ist, wie die Dichte von dem umliegenden Stoff. [alternativ: *gleich schwer (0,5 P.)*]

Ein Stoff oder Gegenstand *steigt auf (1 P.)*, wenn seine Dichte *kleiner (1 P.)* ist als die Dichte von dem umliegenden Stoff. [alternativ: *schwimmt (0,5 P.)*, *leichter (0,5 P.)*, *kleiner leichter (0,5 P.)*]

Aufgabe 4: Aufsteigen und Sinken in flüssigen Stoffen

- a) *Helium, Luft, Olivenöl, Kork, Kohlenstoffdioxid (1 P., wenn alle richtig)*
- b) Schicht (Wachskerze): *Frostschutzmittel (1 P.)* [alternativ: 5 (0,5 P.), *Sonnenblumenöl/Frostschutzmittel (0,5 P.)*]
Schicht (Eiswürfel): *Sonnenblumenöl (1 P.)* [alternativ: *Sonnenblumenöl/Lampenöl (0,5 P.)*]
Kunststoff (Grün): *Polyethylen (PE) (1 P.)*
Kunststoff (Orange): *Polyamid (PA 6) (1 P.)*

Aufgabe 5: Aufsteigen und Sinken in gasförmigen Stoffen

- a) Beobachtung: *Die Seifenblasen schweben über dem Boden (1 P.)* [alternativ: weitere Formulierungen, die im Kern das Schweben der Seifenblasen fokussieren (1 P.)]
Erklärung: *Die Seifenblasen haben eine geringere Dichte als Kohlenstoffdioxid und bleiben somit auf der Gasschicht aus Kohlenstoffdioxid liegen (1 P.)*

- b)** Skizze: Wanne ist nach unten geöffnet und mit Wasserstoff gefüllt. Der Ballon ist mit Helium gefüllt und steigt bis zur Wasserstoffschicht auf. (1 P.)

E Unterrichtsverlaufspläne

E.1 E0 und E1

Unterrichtsverlaufsplan E0 und E1

Vorbereitung:

- ABs umgedreht und sortiert auf jeden Platz
- Experimentierkiste, Waage und zwei Schutzbrillen pro 2er-Gruppe
- Waagen kontrollieren und auf Gramm stellen

1. Stunde: Wie kann man die Masse von Stoffen vergleichen?

Phase	Zeit	Inhalt	Sozial- form	Material
Fragen	5	Lehrkraft zeigt das „Jahrmarkt-Bild“ mittels Flinga und stellt den Auftrag, Fragen zu den Situationen mit den Sprechblasen zu formulieren Lernende senden Fragen an Flinga, die sie sich zu den jeweiligen Situationen im Bild stellen. Lehrkraft liest exemplarisch zwei bis drei Fragen vor. Der Fokus der ersten Stunde wird auf die Fragen zu der Situation „Stärke-Wettbewerb“ gelenkt und zu dem Experiment übergeleitet, z.B. „Ziel ist es, dass ihr am Ende der Doppelstunde möglichst viele dieser Fragen beantworten könnt. In der ersten Stunde konzentrieren wir uns zunächst nur auf eure Fragen zu dem Stärke-Wettbewerb. Dazu starten wir mit einem kleinen Experiment.“	LSG	Jahrmarkt-Bild aus Phase 1 „Fragen“ iPad Flinga Website

2. Stunde: Wie kann man erklären, ob etwas aufsteigt, schwebt oder sinkt?

Phase	Zeit	Inhalt	Sozial- form	Material
Fragen	1	Lehrkraft zeigt das „Jahrmak-Bild“ mittels Flinga und lenkt den Fokus der Stunde auf die verbleibenden Situationen (Ballonstand und Entenfischen)	LSG	Flinga Website
Erkunden	15	SoS liest die Geschichte zum Schokoriegelexperiment vor. Lehrkraft präsentiert Aufgabenstellung. Lernende führen das Experiment in Partnerarbeit durch.	LSG PA	ppt Folie 9 ppt Folie 10
Erschließen	5	Lehrkraft zeigt die Aussagen aus Aufgabe 2 und fordert die Lernenden auf, mithilfe der Experimente zu erklären, wieso Chloe und Jamal falsch liegen. Lehrkraft präsentiert die Aufgabenstellung und erläutert die Funktionsweise der Website.	LSG	ppt Folie 11 ppt Folie 12
Sichern	10	Lernende bearbeiten Aufgabe 3. Lernende füllen den Merkzettel zur Grundvorstellung „Dichte als Maß für den Auftrieb“ aus. SoS stellt ihre/seine Lösung vor. Die anderen korrigieren ggf. Lehrkraft zeigt erneut Jahrmak-Bild und gibt den Auftrag, die restlichen Fragen zu beantworten. Evaluationsbogen, evtl. Post-Test	PA EA LSG	ppt Folie 8 AB 4 AB 5 (Merkzettel)

Erkunden	5	Lehrkraft präsentiert die drei Süßigkeiten <i>Marshmallow</i> , <i>Lakritzbonbon</i> und <i>Speckmaus</i> und fragt: „Wie kann man herausfinden, welche der drei Süßigkeiten aus dem schwersten Stoff besteht?“ Lernende äußern Vermutungen. Mögliche Antworten: - Wiegen -> Rückfrage: Einfach so wiegen? o Falls ja, alle wiegen und Werte notieren. o Anschließend fragen, ob die Speckmaus aus dem schwersten Stoff besteht, weil sie am schwersten ist. Falls ja, kleines Stück abreißen und wiegen, dann erneut fragen. - gleich große Stücke wiegen -> Nachfragen wieso und anschließend von SoS wiederholen lassen - Keine Antwort -> Können wir einfach die Süßigkeiten wiegen und die schwerste besteht dann aus dem schwersten Stoff? -> Falls ja, siehe wiegen. Falls nein, nachfragen wieso nicht. Ziel: Die Lernenden sollen erkennen, dass man das gleiche Volumen betrachten muss. Dann kann mit dem Experiment begonnen werden. Lernende führen Experiment durch und bearbeiten Aufgabe 1 a) + b)	LSG	Marshmallow, Lakritzbonbon, Speckmaus Waage ppt Folie 2
Erschließen	15	Lehrkraft zeigt Folie 5 und fragt, was an dem Beispiel problematisch ist. Ziel: Lernende sollen nochmal die Erkenntnis aus 1a-b reflektieren, dass man das gleiche Volumen betrachten muss Lehrkraft zeigt Video zu Aufgabe 2 (ggf. zweimal). Die Lernenden füllen währenddessen die Lücken aus. Lernende bearbeiten Aufgabe 3.	LSG EA	ppt Folie 4 und 5 ppt Folie 6 und 7 AB 3 ppt Folie 8 AB 4
Sichern	5	Lernende füllen den Merkzettel zur Grundvorstellung „Dichte als Masse eines Einheitswürfels“ aus. SoS stellt ihre/seine Lösung vor. Die anderen korrigieren ggf. Lehrkraft zeigt erneut Jahrmak-Bild und gibt den Auftrag, die einzelnen Fragen zu beantworten.	EA	AB 5 (Merkzettel) Flinga Website

E.2 E2

Unterrichtsverlaufsplan E2

1. Woche: Wie kann man die Masse von Stoffen
verhältnismäßig vergleichen?

Phase	Zeit	Inhalt	Sozial- form	Material
Fragen	6	Lehrkraft zeigt das „Jahrmarkt-Bild“ mittels Flinga und stellt den Auftrag, Fragen zu den Situationen mit den Sprechblasen zu formulieren Lernende senden Fragen an Flinga, die sie sich zu den jeweiligen Situationen im Bild stellen. Lehrkraft liest exemplarisch zwei bis drei Fragen vor. Der Fokus der ersten Stunde wird auf die Fragen zu der Situation „Stärke-Wettbewerb“ gelenkt und zu dem Experiment übergeleitet, z.B. „Ziel ist es, dass ihr am Ende der Doppelstunde möglichst viele dieser Fragen beantworten könnt. In der ersten Stunde konzentrieren wir uns zunächst nur auf eure Fragen zu dem Stärke-Wettbewerb. Dazu starten wir mit einem kleinen Experiment.“	LSG	Jahrmarkt-Bild iPad Flinga Website

Erschließen	5	Lehrkraft zeigt Folie 11 und fordert die Lernenden auf, mithilfe der Erkenntnisse aus den vorherigen Aufgaben zu erklären, was Malia genau meint und welcher Stoff verhältnismäßig am schwersten ist.	Lehrkraft zeigt Folie 9 und 10 und bespricht kurz die Ergebnisse des Experiments	LSG	ppt Folien 9&10
	5	Ziel: Lernende sollen nochmal die Erkenntnis aus 1a+b reflektieren, dass man das gleiche Volumen betrachten muss			ppt Folie 11
	5	Lehrkraft erklärt, dass man in der Chemie für das verhältnismäßige Vergleichen der Masse von Stoffen die Stoffeigenschaft Dichte nutzt. Anschließend zeigt die Lehrkraft das Video aus Aufgabe 3a zweimal, während die Lernenden die Lücken dazu ausfüllen.		EA	ppt Folie 12 und 13 AB 2
	5	Lernende bearbeiten Aufgabe 3c) und 4. (Hier die Süßigkeitenreste in den Müll packen und Experimentierboxen verteilen)		PA	ppt Folie 14 AB 3

Erkünden	6	Lehrkraft präsentiert die drei Süßigkeiten <i>Marshmallow</i>, <i>Lakritzbonbon</i> und <i>Speckmaus</i> und fragt: „Wie können wir herausfinden, welche Süßigkeit am schwersten ist?“ Lernende äußern Vermutungen. Mögliche Antworten: - Wiegen → Folie 4 mit Massen der Süßigkeiten zeigen und Frage beantworten lassen - gleich große Stücke wiegen → Erklärung einfördern, sagen, dass das schon einen Schritt weiter ist und das an dieser Stelle noch gar nicht nötig ist - ins Wasser geben → Erklärung einfördern, Vorschlag auf die zweite Stunde verfrachten Lehrkraft präsentiert Folie 5 und fragt: „Welche Süßigkeit besteht aus dem „schwersten“ Stoff?“ Lernende sollen in einer kurzen Murrelphase den Unterschied zur vorherigen Frage und Möglichkeiten zur Beantwortung der Frage diskutieren Lehrkraft bespricht die Erkenntnisse aus der Murrelphase im Plenum Mögliche Vorschläge zur Beantwortung der Frage: - Wiegen → Das haben wir ja bereits gemacht. - Welche Süßigkeit besteht dann deiner Meinung nach aus dem schwersten Stoff und warum? → Speckmaus, da die am schwersten ist → Folie 6 präsentieren und erneut fragen - gleich große Stücke wiegen → Nachfragen wieso und anschließend von SoS wiederholen lassen Ziel: Die Lernenden sollen erkennen, dass man das gleiche Volumen betrachten muss. Dann kann mit dem Experiment begonnen werden.	LSG	Marshmallow, Lakritzbonbon, Speckmaus ppt Folien 3&4 ppt Folie 5
	10	Lernende führen Experiment durch und bearbeiten Aufgabe 1 a) + b)	PA	ppt Folie 8 AB 1E

Sichern	5	Lernende füllen den Merkzettel zur Grundvorstellung „Dichte als Masse eines Einheitswürfels“ aus. SoS stellt ihre/seine Lösung vor. Die anderen korrigieren ggf.	EA	Merkzettel
	10	Lehrkraft zeigt erneut Jahrmak-Bild und gibt den Auftrag, die einzelnen Fragen zu beantworten. Evtl. Übergreifende Frage stellen: „Wir können zwar nicht genau sagen, aus welchem Stoff die Gegenstände bestehen, aber ihr könnt sagen, in welcher Eigenschaft sich die Stoffe unterscheiden müssen. In welcher denn?“ – „Wie genau?“ – „Wie kommt du darauf, dass bei der Kugel die Dichte größer sein muss?“ – „Kannst du das nochmal mithilfe der Würfelvorstellung erklären?“ (Würfel in die Objekte einzeichnen)	LSG	ppt Folie 15
	52		LSG	Jahrmak-bild

1. & 2. Woche: Wie kann man erklären, ob etwas aufsteigt, schwebt oder sinkt?

Phase	Zeit	Inhalt	Sozialform	Material
Fragen	1	Lehrkraft zeigt das „Jahrmak-Bild“ mittels Flinga und lenkt den Fokus der Stunde auf die verbleibenden Situationen (Ballonstand und Entenfischen)	LSG	Jahrmak-bild

Erkunden	1	SoS liest die Geschichte zum Schokoriegeexperiment vor. Lehrkraft präsentiert Aufgabenstellung.	LSG	ppt Folie 16
	15	Lernende führen das Experiment in Partnerarbeit durch. (mögliches Stundenende)	PA	ppt Folie 17 AB 7.1E & 7.2 E
	5	Lehrkraft zeigt die Aussagen aus Aufgabe 2 und fordert die Lernenden auf, mithilfe der Experimente zu erklären, wieso Chloe und Jerome falsch liegen. (gewünschtes Stundenende) Lehrkraft präsentiert die Aufgabenstellung und erläutert die Funktionsweise der Website.	LSG	ppt Folie 18
Erschließen	12	Lernende bearbeiten Aufgabe 3.	PA	ppt Folie 19&20 AB 8 E
Sichern	5	Lernende füllen den Merkzettel zur Grundvorstellung „Dichte als Maß für den Auftrieb“ aus.	EA	Merkzettel
	10	SoS stellt ihre/seine Lösung vor. Die anderen korrigieren ggf. (mögliches Stundenende) Lehrkraft zeigt erneut Jahrmak-Bild und gibt den Auftrag, die Fragen zu „Entenfischen“ und „Ballonstand“ zu beantworten.	LSG PA	AB 9
	45			

2. Woche: Wie kann man Masse in Volumen und Volumen in Masse umrechnen?

Phase	Zeit	Inhalt	Sozialform	Material

Fragen	6	Lehrkraft wiederholt mithilfe des Jahrmakbildes ausführlich die Inhalte der letzten Doppelstunde.	LSG	Jahrmak- Bild
	22	Die verbleibenden Inhalte aus der vorherigen Stunde werden durchgeführt		
	1	Lehrkraft lenkt den Fokus der Stunde auf die verbleibende Situation „Mandel-Zuckerwatte-Stand“.		
Erkunden	3	Lehrkraft zeigt Rezept aus Aufgabe 1 und fragt, was daran ungewöhnlich ist. Erwartete Beispielantwort: „Zucker und Mehl sind in Milliliter, statt in Gramm angegeben.“	LSG	ppt Folie 21 ppt Folie 22
	12	Lehrkraft präsentiert Aufgabenstellung	PA	AB 13
	5	Lernende sollen das Rezept in ein gewöhnliches Rezept umwandeln, indem sie Aufgabe 1a) und b) bearbeiten. Lehrkraft bespricht die Ergebnisse, indem Sie gemeinsam im Plenum das Rezept umschreibt. Dabei werden die Lernenden aufgefordert, ihren Lösungsweg zu beschreiben.	LSG	ppt Folie 23
	5	Lehrkraft präsentiert Aufgabenstellung Lernende bearbeiten Aufgabe 2	PA	ppt Folie 24 AB 14
Sichern	5	Lernende bearbeiten Merkzettel.	EA	Merkzettel AB 17
	5	SoS stellt ihre/seine Lösung vor. Die anderen korrigieren ggf. Lehrkraft zeigt Jahrmakbild und fordert die Lernenden auf, die verbleibenden Fragen zu beantworten. Falls nicht schon von den Lernenden gestellt, wirft die Lehrkraft folgende Frage auf: „Wie hätte die Frau herausfinden können wie viel 100 g Mandeln und 100 g Zuckerwatte sind?“	LSG	Jahrmak- bild
	15	Evaluation und Posttest		
	84			

E.3 E3

Unterrichtsverlaufsplan E3

1. Unterrichtseinheit: Wie kann man die Masse von Stoffen verhältnismäßig vergleichen?

Phase	Zeit	Inhalt	Sozialform	Material
Fragen	6	Lehrkraft zeigt das „Jahrmarkt-Bild“ mittels Flinga und stellt den Auftrag, Fragen zu den Situationen mit den Sprechblasen zu formulieren Lernende senden Fragen an Flinga, die sie sich zu den jeweiligen Situationen im Bild stellen. Lehrkraft liest exemplarisch zwei bis drei Fragen vor. Der Fokus der ersten Stunde wird auf die Fragen zu der Situation „Stärke-Wettbewerb“ gelenkt und zu dem Experiment übergeleitet, z.B. „Ziel ist es, dass ihr am Ende der Doppelstunde möglichst viele dieser Fragen beantworten könnt. In der ersten Stunde konzentrieren wir uns zunächst nur auf eure Fragen zu dem Stärke-Wettbewerb. Dazu starten wir mit einem kleinen Experiment.“	LSG	Jahrmarkt-bild iPad Flinga Website

Erkunden	6	Lehrkraft präsentiert die drei Süßigkeiten <i>Marshmallow</i>, <i>Lakritzbonbon</i> und <i>Speckmaus</i> und fragt: „Wie können wir herausfinden, welche Süßigkeit am schwersten ist?“ Lernende äußern Vermutungen. Mögliche Antworten: - Wiegen -> Folie 4 mit Massen der Süßigkeiten zeigen und Frage beantworten lassen - gleich große Stücke wiegen -> Erklärung einfordern, sagen, dass das schon einen Schritt weiter ist und das an dieser Stelle noch gar nicht nötig ist - ins Wasser geben -> Erklärung einfordern, Vorschlag auf die zweite Stunde verfrösten Lehrkraft präsentiert Folie 5 und fragt: „Welche Süßigkeit besteht aus dem „schwersten“ Stoff?“ Lernende sollen in einer kurzen Murnelphase den Unterschied zur vorherigen Frage und Möglichkeiten zur Beantwortung der Frage diskutieren Lehrkraft bespricht die Erkenntnisse aus der Murnelphase im Plenum Mögliche Vorschläge zur Beantwortung der Frage: - Wiegen -> Das haben wir ja bereits gemacht. Welche Süßigkeit besteht dann deiner Meinung nach aus dem schwersten Stoff und warum? -> Speckmaus, da die am schwersten ist -> Folie 6 präsentieren und erneut fragen - gleich große Stücke wiegen -> Nachfragen wieso und anschließend von SoS wiederholen lassen Ziel: Die Lernenden sollen erkennen, dass man das gleiche Volumen betrachten muss. Dann kann mit dem Experiment begonnen werden. Lernende führen Experiment durch und bearbeiten Aufgabe 1 a) + b), ggf. Sprinteraufgabe 1	LSG	Marshmallow, Lakritzbonbon, Speckmaus ppt Folien 6&7 ppt Folie 8

Sichern	10	Lehrkraft zeigt erneut Jahrmak-Bild und gibt den Auftrag, die einzelnen Fragen zu beantworten. Evtl. Übergreifende Frage stellen: „Wir können zwar nicht genau sagen, aus welchem Stoff die Gegenstände bestehen, aber ihr könnt sagen, in welcher Eigenschaft sich die Stoffe unterscheiden müssen. In welcher denn?“ – „Wie genau?“ – „Wie kommst du darauf, dass bei der Kugel die Dichte größer sein muss?“ – „Kannst du das nochmal mithilfe der Würfelvorstellung erklären?“ (Würfel in die Objekte einzeichnen)	LSG	Jahrmak-Bild
Erschließen	5	Lehrkraft zeigt Folie 13 und 14 und bespricht kurz die Ergebnisse des Experiments Lehrkraft zeigt Folie 15 und fordert die Lernenden auf, mithilfe der Erkenntnisse aus den vorherigen Aufgaben zu erklären, was Malia genau meint und welcher Stoff verhältnismäßig am schwersten ist. Ziel: Lernende sollen nochmal die Erkenntnis aus 1a+b reflektieren, dass man das gleiche Volumen betrachten muss Lehrkraft erklärt, dass man in der Chemie für das verhältnismäßige Vergleichen der Masse von Stoffen die Stoffeigenschaften Dichte nutzt. Anschließend zeigt die Lehrkraft das Video aus Aufgabe 3a zweimal, während die Lernenden die Lücken dazu ausfüllen. Lernende bearbeiten Aufgabe 3c) und 4. (Hier die Süßigkeitenreste in den Müll packen und Experimentierboxen verteilen) Lehrkraft bespricht die Erkenntnisse aus der Murnelphase im Plenum	LSG	ppt Folien 13&14 ppt Folie 15

Vertiefen	15	Lehrkraft präsentiert die Aufgabenstellung und erläutert die Funktionsweise der Website.	PA	ppt Folie 19
	75	Lernende bearbeiten die Vertiefungsaufgaben 5a, 7 & 6b		

2. Unterrichtseinheit: Wie kann man erklären, ob etwas aufsteigt, schwebt oder sinkt?

Phase	Zeit	Inhalt	Sozialform	Material
Fragen	1	Lehrkraft zeigt das „Jahmarkt-Bild“ mittels Flinga und lenkt den Fokus der Stunde auf die verbleibenden Situationen (Ballonstand und Entenfischen)	LSG	Jahmarkt-bild
Erkunden		SoS liest die Geschichte zum Schokortegelexperiment vor.	LSG	ppt Folie 21
	5	Lehrkraft präsentiert Aufgabenstellung.		
	15	Lernende führen das Experiment in Partnerarbeit durch und bearbeiten ggf. Sprinteraufgabe 2	PA	ppt Folie 22 AB 7.1E & 7.2 E Sprinter 2
Erschließen	5	Lehrkraft zeigt die Aussagen aus Aufgabe 2 und fordert die Lernenden auf, mithilfe der Experimente zu erklären, wieso Chloé und Jerôme falsch liegen.	LSG	ppt Folie 24
	15	Lernende bearbeiten Aufgabe 3.	PA	ppt Folie 25 AB 8 E

Sichern	2	Lernende füllen den Merkzettel zur Grundvorstellung „Dichte als Maß für den Auftrieb“ aus.	EA	Merkzettel
	7	SoS stellt ihre/seine Lösung vor. Die anderen korrigieren ggf. Lehrkraft zeigt erneut Jahmarkt-Bild und gibt den Auftrag, die Fragen zu „Entenfischen“ und „Ballonstand“ zu beantworten.	LSG	
Vertiefen	15	Lernende bearbeiten die Vertiefungsaufgaben 4 & 5	PA	AB 9 ppt Folie 26
	65			

Sprinteraufgabe 1

Bei Aufgabe 1 steht das Wort „schwer“ immer in Anführungszeichen, da man die Frage nach dem „schwereren Stoff“ eigentlich gar nicht beantworten kann.

- Überlegt euch anhand von Wolle und Eisen, wie man zeigen kann, dass weder Wolle noch Eisen a) der schwerere Stoff sein kann.
b) Viele Menschen würden dennoch behaupten „Eisen ist schwerer als Wolle“, obwohl es falsch ist. Wie müsste der Satz lauten, wenn man es richtig ausdrücken möchte?

Lösung



a)

- b) Mögliche Sätze: „Eisen ist **bei gleichem Volumen** schwerer als Wolle“ oder „Eisen ist **verhältnismäßig** schwerer als Wolle“

Sprinteraufgabe 2

- das Marshmallow
das Lakritzbonbon
die Speckmaus
- a) Welche der drei Süßigkeiten werden schwimmen, und welche sinken? Stelle eine begründete Vermutung auf und überprüfe sie.
Wie ändert sich das Schwimmverhalten der drei Süßigkeiten, wenn du sie alle gleich groß schniddest? Stelle eine begründete Vermutung auf und überprüfe sie.
- b)

F Digitaler Anhang

Der digitale Anhang (auf CD beiliegend) enthält folgende Materialien:

- *Nicht-Übereinstimmungen_KonsensuellesCodieren.xlsx*: Dokumentation der Nicht-Übereinstimmungen und Einigungen auf Codierungen im Prozess des konsensuellen Codierens
- *Codehäufigkeiten_Artefakte_Würfelvorstellung.pdf*: Detaillierte Darstellung der im Rahmen der Artefaktanalyse zur Würfelvorstellung ermittelten Codehäufigkeiten für E0-E3
- *Codehäufigkeiten_Artefakte_Auftriebsvorstellung.pdf*: Detaillierte Darstellung der im Rahmen der Artefaktanalyse zur Auftriebsvorstellung ermittelten Codehäufigkeiten für E0-E3
- *Codehäufigkeiten_Tests.pdf*: Detaillierte Darstellung der im Rahmen der Testauswertung ermittelten Codehäufigkeiten für E2 und E3
- *Artefaktanalyse_Punktverteilung.xlsx*: Individuell erreichte Punktzahlen (E2 und E3) und Ablenkungszeiten (E3) der Lernenden im Rahmen der Artefaktanalyse
- *Testergebnisse.xlsx*: Testergebnisse von E2 und E3
- *Evaluation_GeschlossenItems.xlsx*: Evaluationsergebnisse und Berechnungen der geschlossenen Items von E2 und E3
- *StatistischeTestergebnisse_E3.xlsx*: Output-Datei zu den statistischen Analysen von E3
- *StatistischeTestergebnisse_E2.docx*: Output-Datei zu den statistischen Analysen von E2

Bisher erschienene Bände der Reihe

Lernen in Naturwissenschaften

ISSN 2566-493X

-
1	Maria Egbers	Konzeptentwicklungs- und Gesprächsprozesse im Rahmen der Unterrichtskonzeption „choice2learn“ ISBN 978-3-8325-4510-9 53.00 EUR
2	Daniel Laumann	Magnetismus hoch 4. Fachliche Strukturierung und Entwicklung multipler Repräsentationen zum Magnetismus für die Hochschule ISBN 978-3-8325-4571-0 60.50 EUR
3	Friederike Rohrbach-Lochner	Design-Based Research zur Weiterentwicklung der chemiedidaktischen Lehrerausbildung zu Schülervorstellungen. Entwicklung und Evaluation eines an Forschendem Lernen orientierten Seminarkonzepts ISBN 978-3-8325-4944-2 53.50 EUR
4	Lisa Rott	Vorstellungsentwicklungen und gemeinsames Lernen im inklusiven Sachunterricht initiieren. Die Unterrichtskonzeption „choice2explore“ ISBN 978-3-8325-4817-9 83.00 EUR
5	Eva Julia Kolbeck	Schulung von Vermittlungsfähigkeiten Promovierender im Fach Chemie. Die Weiterbildung „How to communicate chemistry?“ ISBN 978-3-8325-4953-4 71.00 EUR
6	Björn Dellbrügge	Choice2interact. Interaktiv Lernen mit Tablets im Chemieunterricht ISBN 978-3-8325-5119-3 79.00 EUR
7	Felicitas Jürgensmeier	Offene Experimentiersituationen ermöglichen und charakterisieren. Eine Schülerlaboreinheit zu einem curricular innovativen Thema ISBN 978-3-8325-5184-1 89.00 EUR

8	Jan-Bernd Haas	chem.LEVEL. Fachsprachlich sensibler Chemieunterricht auf Basis des Johnstone Dreiecks ISBN 978-3-8325-5345-6 89.00 EUR
9	Florian Jungkamp	Kontroversen mit Hilfe wissenschaftlicher Prüfkriterien bewerten. Die Unterrichtskonzeption choice ² reflect ISBN 978-3-8325-5362-3 69.50 EUR
10	Christopher Kralisch	Wissenschaftskriterien verstehen und anwenden Weiterentwicklung der Unterrichtskonzeption choice ² reflect zur Bewertung gesellschaftlicher Kontroversen ISBN 978-3-8325-5517-7 91.50 EUR
11	Fabian Gust	Das Self-assembLAB. Entwicklung, Erprobung und Optimierung eines curricular innovativen Schülerlabors zum Thema Self-assembly ISBN 978-3-8325-5517-7 85.50 EUR
12	Marius van den Boom	Die Unterrichtskonzeption <i>feil</i> . Fehlschlüsse identifizieren lernen ISBN 978-3-8325-5562-7 87.00 EUR
13	Larissa Katharina Fühner	Experimentierpraxis im Spektrum der Möglichkeiten. Eine rekonstruktive Analyse der Experimentierpraxis im inklusionsorientierten Physikunterricht ISBN 978-3-8325-5562-7 59.50 EUR
14	Tobias Bergold	NAWI-Konzepte. Digitaler Transfer von neuen Unterrichtskonzepten für den naturwissenschaftlichen Unterricht mithilfe einer Website ISBN 978-3-8325-5719-5 78.00 EUR
15	Yvonne Rath	Stolpersteine im Lehrerhandeln. Anbahnung eines Handlungsrepertoires durch videobasierte Reflexionen im Lehr-Lern-Labor ISBN 978-3-8325-5769-0 89.00 EUR
16	Carolin Banse	Nachhaltigkeit bewerten mithilfe einer Bewertungsscheibe. Entwicklung einer Konzeption für den naturwissenschaftlichen Unterricht am Beispiel Elektromobilität ISBN 978-3-8325-5895-6 98.50 EUR

17	Fabienne Elisabeth Kremer	Die Bereitstellungsform als Stellschraube im digital gestützten Unterricht? Eine Beurteilung von BYOD und Pool aus didaktischer Perspektive ISBN 978-3-8325-6031-7 78.00 EUR
18	Pascal Dorweiler	Mathematische Grundvorstellungen im Chemieunterricht. Entwicklung und Untersuchung einer Unterrichtskonzeption zur Förderung des Verstehens mathematisch-chemischer Begriffe ISBN 978-3-8325-6077-5 90.50 EUR

Alle erschienenen Bücher können unter der angegebenen ISBN-Nummer direkt online (<http://www.logos-verlag.de>) oder per Fax (030 - 42 85 10 92) beim Logos Verlag Berlin bestellt werden.

Verstehen und *Entwickeln* bilden eine fachdidaktische Einheit: Das Verstehen von Lernprozessen hilft uns, innovative Lernangebote zu entwickeln und an Rahmenbedingungen anzupassen. Die Erprobung und Analyse dieser Angebote kann wiederum zu erweiterten Erkenntnissen und einem tieferen Verstehen führen. Diese Schriftenreihe rückt daher beide Aspekte in den Fokus – mit dem Ziel, das zu fördern, was uns als Naturwissenschaftsdidaktikern am Herzen liegt: das Lernen in Naturwissenschaften!

Wie kann das Verständnis mathematisch-chemischer Begriffe wie „Dichte“ im Chemieunterricht nachhaltig gefördert werden?

Im Rahmen eines Design-Based Research-Ansatzes wurde eine Unterrichtskonzeption mit begleitenden Lernmaterialien entwickelt und erprobt, die das mathematikdidaktische Grundvorstellungskonzept mit dem Johnstone-Dreieck verbindet. Ausgehend von historischen, empirischen und schulbuchanalytischen Befunden wurden vier Grundvorstellungen zur Dichte hergeleitet: Dichte als Masse eines Einheitswürfels, Dichte als Maß für den Auftrieb, Dichte als Gesamtteilchenmasse eines Einheitswürfels sowie Dichte als Umrechnungsgröße. Die begleitenden Lernmaterialien wurden iterativ mit Lernenden evaluiert und optimiert. Die Wirksamkeit zeigte sich in einer teils nachhaltigen Vorstellungsentwicklung in Richtung der Grundvorstellungen.

Mit praxisnahen Materialien und theoretischen Erkenntnissen über das Verstehen mathematischer Begriffe im Chemieunterricht bietet diese Arbeit konkrete Unterstützung für Lehrkräfte und neue Anknüpfungspunkte für die fachdidaktische Forschung.

ISBN 978-3-8325-6077-5

Logos Verlag Berlin

ISSN 2566-493X