

Kuske-Janßen, Wiebke Hinrike

Sprachlicher Umgang mit Formeln von LehrerInnen im Physikunterricht am Beispiel des elektrischen Widerstandes in Klassenstufe 8

Berlin : Logos Verlag 2020, x, 402 S. - (Studien zum Physik- und Chemielernen; 305) - (Dissertation, Technische Universität Dresden, 2020)



Quellenangabe/ Reference:

Kuske-Janßen, Wiebke Hinrike: Sprachlicher Umgang mit Formeln von LehrerInnen im Physikunterricht am Beispiel des elektrischen Widerstandes in Klassenstufe 8. Berlin : Logos Verlag 2020, x, 402 S. - (Studien zum Physik- und Chemielernen; 305) - (Dissertation, Technische Universität Dresden, 2020) - URN: urn:nbn:de:0111-pedocs-334096 - DOI: 10.25656/01:33409; 10.30819/5183

<https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0111-pedocs-334096>

<https://doi.org/10.25656/01:33409>

in Kooperation mit / in cooperation with:



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

Nutzungsbedingungen

Dieses Dokument steht unter folgender Creative Commons-Lizenz: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.de> - Sie dürfen das Werk bzw. den Inhalt unter folgenden Bedingungen vervielfältigen, verbreiten und öffentlich zugänglich machen: Sie müssen den Namen des Autors/Rechteinhabers in der von ihm festgelegten Weise nennen. Dieses Werk bzw. dieser Inhalt darf nicht für kommerzielle Zwecke verwendet werden und es darf nicht bearbeitet, abgewandelt oder in anderer Weise verändert werden.

Mit der Verwendung dieses Dokuments erkennen Sie die Nutzungsbedingungen an.

Terms of use

This document is published under following Creative Commons-License: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.en> - You may copy, distribute and transmit, adapt or exhibit the work in the public as long as you attribute the work in the manner specified by the author or licensor. You are not allowed to make commercial use of the work or its contents. You are not allowed to alter, transform, or change this work in any other way.

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



Kontakt / Contact:

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

Mitglied der


Leibniz-Gemeinschaft

Studien zum Physik- und Chemielernen

H. Niedderer, H. Fischler, E. Sumfleth [Hrsg.]

305

Wiebke Hinrike Kuske-Janßen

Sprachlicher Umgang mit Formeln

von LehrerInnen im Physikunterricht am
Beispiel des elektrischen Widerstandes
in Klassenstufe 8



λογος

Studien zum Physik- und Chemielernen

Herausgegeben von Hans Niedderer, Helmut Fischler und Elke Sumfleth

Diese Reihe im Logos-Verlag bietet ein Forum zur Veröffentlichung von wissenschaftlichen Studien zum Physik- und Chemielernen. In ihr werden Ergebnisse empirischer Untersuchungen zum Physik- und Chemielernen dargestellt, z. B. über Schülervorstellungen, Lehr-/Lernprozesse in Schule und Hochschule oder Evaluationsstudien. Von Bedeutung sind auch Arbeiten über Motivation und Einstellungen sowie Interessensgebiete im Physik- und Chemieunterricht. Die Reihe fühlt sich damit der Tradition der empirisch orientierten Forschung in den Fachdidaktiken verpflichtet. Die Herausgeber hoffen, durch die Herausgabe von Studien hoher Qualität einen Beitrag zur weiteren Stabilisierung der physik- und chemiedidaktischen Forschung und zur Förderung eines an den Ergebnissen fachdidaktischer Forschung orientierten Unterrichts in den beiden Fächern zu leisten.

Hans Niedderer

Helmut Fischler

Elke Sumfleth

Studien zum Physik- und Chemielernen

Band 305

Wiebke Hinrike Kuske-Janßen

**Sprachlicher Umgang mit Formeln von LehrerInnen
im Physikunterricht am Beispiel des elektrischen
Widerstandes in Klassenstufe 8**

Logos Verlag Berlin



Studien zum Physik- und Chemielernen

Hans Niederer, Helmut Fischler, Elke Sumfleth [Hrsg.]

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

© Copyright Logos Verlag Berlin GmbH 2020

Alle Rechte vorbehalten.

ISBN 978-3-8325-5183-4

ISSN 1614-8967



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

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

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

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

Sprachlicher Umgang mit Formeln

von LehrerInnen im Physikunterricht
am Beispiel des elektrischen Widerstandes in Klassenstufe 8

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades
Doctor rerum naturalium
(Dr. rer. nat.)

vorgelegt
dem Bereich Mathematik und Naturwissenschaften
der Technischen Universität Dresden

von
Wiebke Hinrike Kuske-Janßen
geboren am 18.04.1989 in Aurich



Eingereicht am: 11.05.2020
Verteidigt am: 10.08.2020
Erstgutachterin: Prof. Dr. Gesche Pospiech
Technische Universität Dresden
Zweitgutachter: Prof. Dr. Ricardo Karam
University of Copenhagen

Zusammenfassung

Formeln sind eine wichtige Darstellungsform der Physik. Sie fassen empirische Ergebnisse mathematisch zusammen und ermöglichen z. B. quantitative Vorhersagen und die Planung und Dimensionierung von Experimenten. Empirische Ergebnisse der physikdidaktischen Forschung zeigen jedoch, dass Lernende mit mathematischen Elementen und insbesondere Formeln im Physikunterricht häufig Schwierigkeiten haben. Insbesondere eine inhaltssvolle Beschreibung und Reflexion mathematischer Ausdrücke in ihrem spezifischen physikalischen Kontext in einem strukturellen Sinne (n. Pietrocola, 2008) scheint Lernenden schwer zu fallen (vgl. z. B. Bagno, Berger und Eylon, 2008). Dies wirft die Frage auf, wie Lehrende im Physikunterricht diese inhaltliche Seite von Formeln vermitteln, welche Bedeutungsangebote sie den Lernenden durch verbale Erklärungen machen.

Nach einer Darstellung des theoretischen Hintergrunds und Empiriestandes zu Formeln und zur verbalen Kommunikation im Physikunterricht, wird ein Ebenenmodell der Versprachlichung von Formeln aus der Theorie hergeleitet. Dieses Modell beschreibt das Sprechen von LehrerInnen über Formeln und ihre inhaltliche Bedeutung mit Hilfe verschiedener Ebenen semantischer Dichte, Graden an Quantifizierung und sprachlichen Varietäten. Es basiert zum einen auf sprachwissenschaftlichen Überlegungen, aber auch auf fachdidaktischen Klassifizierungen von Darstellungsformen.

Um die Frage zu beantworten, wie LehrerInnen im Physikunterricht Formeln mit verbaler Sprache verknüpfen, werden in dieser qualitativen, explorativ ausgerichteten Studie 10 LehrerInnen unterschiedlicher Schulformen im Unterricht der Klassenstufe 8 zum Thema elektrischer Widerstand hospitiert und ihre Sprache aufgezeichnet. Die Unterrichtstranskripte werden mit der Methode der qualitativen Inhaltsanalyse (n. Kuckartz, 2016) analysiert.

Das Kategoriensystem als Ergebnis dieser Inhaltsanalyse zeigt ein sehr breites und vielfältiges Sprechen über Formeln und Formelbedeutung. Meist bleibt die Verknüpfung der beschriebenen Inhalte mit der Formel jedoch implizit und wird nicht explizit ausgeführt. Das Kategoriensystem und das entwickelte Ebenenmodell erweisen sich als geeignete Instrumente, um das Sprechen der LehrerInnen zu beschreiben und zu analysieren. Die Ergebnisse der Inhaltsanalyse werden mit Hilfe der theoretischen Grundlage zu verschiedenen sprachlichen Varietäten im Physikunterricht sowie fachdidaktischen Erkenntnissen zur Mathematik und Formeln im Physikunterricht eingeordnet. Insbesondere wird analysiert, welche Aspekte von Formelverständnis die LehrerInnen ansprechen und welche Äußerungen Hinweise auf einen eher technischen oder strukturellen Umgang mit Mathematik (n. Pietrocola, 2008) liefern.

Abstract

Formulas play as part of mathematization of physics and typical mathematical representations an important role in physics and physics classrooms. Besides technical skills a structural connection between physics and mathematics is important for understanding mathematical expressions (Pietrocola, 2008). On the other hand empirical results concerning mathematics in physics education show that students have difficulties handling and understanding formulas. Particularly physical interpretations of mathematical expressions seem to be problematic for students (e. g. Bagno, Berger und Eylon, 2008). This mismatch raises the question how teachers in physics classes mediate the content-related meanings of formulas, how they use formulas in their verbal language and how they speak about formulas.

As theoretical background and base of this study the theoretical part contains theoretical considerations und empirical results concerning mathematics and formulas for physics learning and verbal communication in physics lessons. A model describing different levels of verbalization of a formula will be derived from theoretical considerations including also linguistic reflections and categorizations of representations in physics lessons. This model helps to describe teachers speaking with and about formulas.

The empirical part of this PhD-Thesis presents the results of classroom-observations. 10 physics-teachers were observed teaching the electric resistance in grade 8. Their speech was recorded and analyzed with the help of qualitative content analysis (Kuckartz, 2016). The results show that the teachers speak variously about formulas and their meaning. Certainly the interpretations and implications of formulas often are not explained explicitly but remain implicit. The designed system of categories and the developed model of verbalization of a formula turn out to be applicable for describing and analyzing the verbal speech of teachers concerning formulas and their meaning. The empirical results are being interpreted in the context of theoretically defined elements of the understanding of a formula and aspects of a more technical or structural handling with formulas.

Danksagung

Diese 402 Seiten Dissertation habe ich alleine geschrieben. Aber die dahinterstehenden 4740 Minuten beobachteten Unterrichts und 1964 Minuten transkribierten Unterrichts, 620 km mit dem Fahrrad gefahrene Wegstrecke zu den Hospitationen, mindestens 1000 l Kaffee, Ideen, veränderte Ideen und über Bord geschmissene Ideen, Pläne, veränderte Pläne, umgeworfene Pläne, dieser über 7 Jahre gegangene Weg bis hierher, das wäre alles nicht möglich gewesen ohne die Unterstützung vieler Menschen, denen ich an dieser Stelle danken möchte.

Zu allererst möchte ich meiner Doktormutter Prof. Gesche Pospiech danken, die in mir die Idee überhaupt erst geweckt hat, den Weg einer Promotion zu gehen, die mir diesen Weg zugetraut hat und mir immer sehr viele Freiheiten gelassen hat, diesen Weg auch selbst zu finden. Insbesondere nach der Geburt meines ersten Sohnes hat sie mich beim Wiedereinstieg in den Beruf und die Forschung sehr unterstützt und es mir immer möglich gemacht, Familie, Lehrverpflichtungen und eigene Forschung gut unter einen Hut zu bekommen. Dafür bin ich Ihnen sehr dankbar! Insbesondere die Rolle als Mutter, Lehrende und Forschende wäre aber auch ohne meine KollegInnen am Lehrstuhl Didaktik der Physik nicht so unproblematisch umzusetzen gewesen. Ihr habt immer viel Verständnis aufgebracht, seid eingesprungen, habt mir zugehört und zugesprochen und mich bei meiner Promotion durch zahlreiche Diskussionen, kritisches Zuhören und Feedback unterstützt. Danke dafür!

Außerdem möchte ich meinem Zweitgutachter Prof. Ricardo Karam danken. Danke, dass du mir besonders in der Anfangsphase meiner Promotion zugehört hast, mir Mut gemacht hast, und immer gute Ideen und Hilfestellungen hattest!

Diese Arbeit wäre natürlich nicht möglich gewesen, wenn ich nicht LehrerInnen gefunden hätte, die mich bereitwillig an ihrem Unterricht haben teilhaben lassen. Ich habe motivierte, fröhliche und empathische LehrerInnen erlebt, unabhängig davon, ob sie nun 2 oder bereits 20 Jahre vor der Klasse standen. Für diese Erfahrung und das Vertrauen bin ich Ihnen sehr dankbar!

Für die finanzielle Unterstützung für studentische Hilfskräfte und technische Ausstattung danke ich außerdem der Graduiertenakademie der TU Dresden und der Gesellschaft der Freunde und Förderer der TU Dresden, sowie der TU Dresden selbst, die mich im Rahmen der Gleichstellungsmittel finanziell unterstützt hat.

Meinen fleißigen studentischen Hilfskräften Nico, Franzi und ganz besonders Julia möchte ich für ihre gewissenhafte Arbeit, konstruktive Kritik und gute Diskussionen danken. Nico, als außerdem Kollege und guter Freund, auch für all die seelische, soft- und hardwaretechnische und koffeinhaltige Unterstützung!

Besondere inhaltliche, methodische und motivatorische Unterstützung habe ich durch meine Kolleginnen und Freundinnen Marie und Antje erfahren: Ohne euch wäre diese Arbeit nicht das, was sie geworden ist und der Weg hierher wäre nicht halb so lustig, fröhlich, intensiv gewesen. Unsere WAM-tastische Zeit in Israel und auf zahlreichen Tagungen wird mir immer in Erinnerung bleiben! Danke ihr beiden, dass ihr für mich da seid!

Ohne meine FreundInnen hätte ich vermutlich schon mein Studium gar nicht geschafft: Jacob, du hast mir bei so vielen Dingen geholfen, nicht zuletzt Danke für die L^AT_EX-Ermutigung und Hilfen! Ohne Christina, Christian und Flo hätte ich nicht halb so viel Spaß beim Studieren gehabt und wäre dann vermutlich auch nicht so gerne an der Uni geblieben. Und Liesa, du hast immer ein offenes Ohr und Herz für mich!

Und diese Arbeit wäre überhaupt nicht möglich gewesen ohne meine Familie: Mama und Papa: Danke, dass ihr mich immer darin bestärkt, meinen Weg zu gehen und mich unterstützt! Thomas: Du machst mir immer Mut, auch steinige Wege zu gehen, ob nun im Gebirge oder im Alltag – die Aussicht hat sich bis jetzt noch immer gelohnt. Danke!! Unsere wundervollen Söhne Frerich und Onno zeigen mir immer wieder, was wirklich wichtig ist und was ich vielleicht auch einfach mal sein lassen kann und sie bringen so viel Freude in mein Leben! Trotzdem bin ich meiner Schwester Hanna und meinem Schwager Eric sehr dankbar, dass sie mir mit zahlreichen Stunden des Kinder-Bespaßens und -Hütens konzentriertes Arbeiten ermöglicht haben. Danke, ihr beiden!

Wiebke Hinrike Kuske-Janßen
Dresden, im Mai 2020

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	3
1.1. Forschungsziele und Einordnung der Arbeit	3
1.2. Aufbau der Arbeit	5
I. Theoretische Grundlage und Forschungsstand	9
2. Physik und Mathematik	11
2.1. Rolle und Funktionen der Mathematik in der Physik	14
2.1.1. Folgen der Mathematisierung für die Wissenschaft Physik .	16
2.1.2. Funktionen der Mathematik in der Physik	17
2.1.3. Rolle der Mathematik in der Physik	19
2.1.4. Mathematik als Sprache der Physik	21
3. Physikunterricht und Mathematik	23
3.1. Mathematische Darstellungsformen im Physikunterricht	24
3.2. Die Rolle der Mathematik im Physikunterricht	26
3.3. Formeln im Physikunterricht	30
3.3.1. Zum Begriff Formel	32
3.3.2. Formelinhalt: Was sagt eine Formel inhaltlich aus?	34
3.3.3. Lehrendenperspektive: Was denken LehrerInnen über For- meln?	42
3.3.4. Aktivitäten mit Formeln: Was sollen SchülerInnen im Un- terricht mit Formeln tun?	46
3.3.5. Lernschwierigkeiten in Bezug auf Formeln im Physikunter- richt	52
4. Kommunikation im Physikunterricht	65
4.1. Was ist Sprache?	67
4.2. Sprachliche Varietäten im Physikunterricht	69
4.2.1. Zum Begriff der Alltagssprache	71

4.2.2.	Zu den Begriffen Unterrichtssprache und Bildungssprache	72
4.2.3.	Zur Rolle von Alltagssprache und Fachsprache im Physik- unterricht	73
4.3.	Merkmale von Fachsprache, Alltagssprache und Unterrichtssprache	75
4.3.1.	Merkmale von Fachsprache	76
4.3.2.	Merkmale von Alltagssprache	79
4.3.3.	Merkmale der Unterrichtssprache	79
4.4.	Fachdidaktische Erkenntnisse zur Sprache im Physikunterricht	80
4.4.1.	Der Weg zur Fachsprache	81
4.4.2.	Kompetenzmodelle zur physikspezifischen Kommunikati- onsfähigkeit	83
4.4.3.	Implikationen für den Unterricht	87
5.	Ebenenmodell der Versprachlichung von Formeln	91
5.1.	Theoretische Grundlagen: Klassifikation von Darstellungen	91
5.2.	Ebenenmodell: sprachwissenschaftliche Grundlagen	95
5.3.	Ebenenmodell: Induktive Anpassungen	99
5.3.1.	Ergänzung der Ebene IIA nach Lehrbuchanalysen	99
5.3.2.	Ausdifferenzierung der Ebene IV und Ergänzung der Ebe- nen VI und Meta-Ebene nach Hauptstudie	101
5.4.	Beschreibung des Ebenenmodells	102
6.	Zusammenfassung Theorie	109
II.	Methodik	113
7.	Forschungsdesign	115
8.	Vorstudien	119
8.1.	Überprüfung und Adaption des Ebenenmodells	119
8.1.1.	Lehrbuchanalysen	119
8.1.2.	Explorative Lehrerbefragungen	123
8.1.3.	Konsequenzen aus den Vorstudien für die Hauptstudie	126
8.2.	Pilotierung der Erhebungsinstrumente	126
9.	Auswertungsmethodik	129
9.1.	Transkription	129
9.2.	Entwicklung des Kategoriensystems	129

9.3. Analysen und Visualisierungen	133
10. Beschreibung der Stichprobe	135
11. Gütekriterien	139
III. Ergebnisse	141
12. LehrerInnen sprechen mit und über Formeln	143
12.1. LehrerInnen sprechen und schreiben Formeln	147
12.1.1. Formel	149
12.1.2. Wortformel	151
12.1.3. Formelsatz mit Formelzeichen	152
12.1.4. Formelsatz mit Termini	155
12.2. LehrerInnen wenden Formeln an oder interpretieren Formeln	161
12.2.1. Rechnung	162
12.2.2. Herleitung der Formel	176
12.2.3. Messprinzip	179
12.2.4. Beschreibung der Einheit	180
12.2.5. Zusammenhang der Größen untereinander	181
12.2.6. Anwendung oder Experiment	193
12.2.7. Beschreibung einzelner Größen	199
12.2.8. Modell	203
12.2.9. Analogie	205
12.3. LehrerInnen sprechen über Formeln	209
12.3.1. Wichtigkeit oder Vorteile der Formel	213
12.3.2. Gültigkeitsbedingungen	217
12.3.3. Anwendungsbereich der Formel	220
12.3.4. Erkenntnistheoretische Klassifizierung der Formel	223
12.3.5. Vergleich von Experiment und Theorie	231
12.3.6. Analogie zu anderen Formeln	234
12.3.7. Merkhilfen	236
12.3.8. Metareflexion über Sprache	237
13. Analyse der Ergebnisse mit Ebenenmodell	243
13.1. Zuordnung von Kategorien und Ebenen	243
13.2. Häufigkeitsanalysen bezogen auf die Ebenen	248

13.3. Charakterisierung der Lehrersprache	249
14. Zusammenfassende Diskussion des Sprechens mit und über Formeln	255
14.1. Wie sprechen LehrerInnen Formeln?	255
14.2. Wie wenden LehrerInnen Formeln an und interpretieren diese? . .	258
14.3. Wie sprechen LehrerInnen über Formeln?	260
14.4. Zusammenfassende Analyse Ergebnisse	262
14.5. Aspekte von Formelverständnis in Theorie und Praxis	265
14.6. Praktische Anwendungen von Teaching Pattern zur Vermittlung von Formelverständnis	268
15. Technischer und Struktureller Umgang mit Formeln	273
15.1. Der Antwortsatz bei Rechnungen	274
15.2. Umgang mit Einheiten	277
15.2.1. Einführung von Einheiten	277
15.2.2. Einheitenkontrolle und Umrechnung in Grundeinheiten . .	278
15.3. Reihenfolge von Proportionalitäten	280
15.4. Verknüpfung von Mathematik und Physik	282
15.5. Zusammenfassende Diskussion: Technischer und struktureller Um- gang mit Mathematik	287
IV. Zusammenfassung und Ausblick	289
16. Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse	291
17. Ausblick	297
18. Implikationen für den Unterricht	299
Anhang	303
Verzeichnis der Anhänge	303
Verzeichnisse	379
Abbildungsverzeichnis	379
Tabellenverzeichnis	383
Abkürzungsverzeichnis	388
Literatur	388

Einleitung

1. Einleitung

Formeln sind für Physik und Physikunterricht von zentraler Bedeutung. Mithilfe von Formeln können physikalische Gesetze kurz und prägnant ausgedrückt werden, sie beschreiben, wie sich Größen zueinander verhalten, sie ermöglichen Prognosen und Berechnungen unbekannter Größen. Ein berühmtes Beispiel ist die Formel $E = mc^2$, die in der Öffentlichkeit untrennbar mit Einstein und der Speziellen Relativitätstheorie verknüpft ist. Für einen Physiker oder eine Physikerin ermöglicht diese Formel nicht nur, die Ruheenergie für eine bestimmte Masse zu berechnen, sondern sie fasst fundamentale theoretische Erkenntnisse zusammen und beschreibt das Prinzip der Äquivalenz von Masse und Energie. Ein Verständnis der Bedeutung dieser Formel geht somit weit über die Berechnung einer Energie hinaus. Die Formel drückt inhaltlich etwas aus, hat also eine eigene Semantik. Sie fasst theoretische oder empirische Erkenntnisse zusammen. Sie hat eine spezifische Bedeutung für die Physik und nimmt mit ihrer Aussage und als Darstellungsform eine spezifische Rolle innerhalb der Wissenschaft Physik ein. Der Umgang mit einer solchen umfassenden Formelsemantik und -bedeutung soll Gegenstand dieser Arbeit sein. Im Folgenden soll die Arbeit zunächst inhaltlich und methodisch eingeordnet, ihre Forschungsziele und ihr formaler Aufbau beschrieben werden.

1.1. Forschungsziele und Einordnung der Arbeit

„When a mathematician engaged in investigating physical actions and results has arrived at his conclusion, may they be not expressed in common language as fully, clearly, and definitely as in mathematical formulae?“
(Faraday, 1990a, S. 552)

Wie ist der Zusammenhang zwischen einem mathematischen Ausdruck und verbaler Sprache? Welche Informationen enthält eine Formel und wieviel Übersetzungsleistung ist notwendig, um eine Formel in ihrer Bedeutung zu entschlüsseln? Das obige Zitat von Faraday, das aus einem Briefwechsel mit Maxwell im Jahr 1857 stammt, zeigt, dass diese Frage bereits in der Geschichte praktizierende Physiker beschäftigte.

In dieser Frage kann sich kristallisieren, was eine physikalische Erkenntnis ausmacht, welche äußere Form und inhaltlichen Ausdruck physikalische Erkenntnisse haben und haben sollten. Geschichtlich zeigt sich diese Kontroverse beispielsweise in dem Ringen um eine angemessene Interpretation der Quantenmechanik (für einen Überblick s. z. B. Friebe *et al.*, 2015). Überspitzt gesagt: Endet physikalische Erkenntnis dort, wo ein mathematischer Formalismus zur zufriedenstellenden Beschreibung experimenteller Daten gefunden wurde, oder geht Physik darüber hinaus und muss sich auch Gedanken machen darüber, was dieser mathematische Formalismus nun wieder für unsere Wirklichkeit bedeutet?

Wie Gingras (2001) in seinem vielbeachteten Artikel „What did Mathematics do to Physics?“ beschreibt, hat die Mathematik die Physik als Wissenschaft stark beeinflusst. Heute ist Physik ohne Mathematik nicht mehr denkbar und durchdringt sie vom einfachen Messprozess, dem eine Quantifizierung der Natur zugrundeliegt, über mathematische Formalismen bei der Datenauswertung bis hin zur mathematischen „Erkundung“ und „Entdeckung“ neuer physikalischer Theorien in der theoretischen Physik (bspw. der Vorhersage neuer Elementarteilchen aufgrund mathematischer Symmetrieüberlegungen).

Eine besondere Relevanz hat die Mathematik auch in Vermittlungskontexten. Denn während die verbale Sprache die Sprache ist, in der wir uns täglich ausdrücken und in der alltägliche Kommunikationsprozesse ablaufen, ist die Mathematik eine Sprache, die Lernende von Physik erst zu entschlüsseln und zu benutzen lernen müssen. Mit der Bedeutung von Mathematik für den Physikunterricht und das Lernen von Physik haben sich in den letzten Jahren mehrere Arbeiten in der Physikdidaktik beschäftigt. Einen Überblick über den internationalen aktuellen Forschungsstand geben beispielsweise Pospiech, Michelini und Eylon (2019).

Viele Forschungsarbeiten befassten sich aber bisher vor allem mit Lernenden der Sekundarstufe 2 oder Studierenden. Mathematik und mathematische Darstellungsformen sind aber von Beginn an für das Lernen von Physik relevant, was sich auch in den Vorgaben der Lehrpläne oder in zahlreichen mathematischen Darstellungsformen in Lehrbüchern widerspiegelt. Formeln sind im Physikunterricht ein zentraler Aspekt der Mathematisierung, der bereits im Anfangsunterricht eine wichtige Rolle spielt. Gleichzeitig zeigen viele Forschungsarbeiten, dass Lernende insbesondere mit einer Beschreibung von Formelinhalten Schwierigkeiten haben (vgl. z. B. Bagno, Berger und Eylon, 2008). Muckenfuß (1995) verlangt, dass Verstandenes immer auch in Alltagssprache ausgedrückt werden sollte, da nur so ein wirkliches Verstehen fachsprachlicher Ausdrücke (und damit auch Formeln) gewährleistet und kontrolliert werden kann. Auf Formeln übertragen bedeutet dies, dass ein rechnerisches Handhaben von

Formeln nicht alleiniges Ziel des Physikunterrichtes sein sollte und es auch im Sinne einer strukturellen Verknüpfung von Mathematik und Physik (n. Pietrocola, 2008) von großer Relevanz ist, über inhaltliche Formelbedeutungen zu sprechen.

Diese Diskrepanz zwischen dem, was in der Fachdidaktik als sinnvolles Lernziel angenommen wird (ein inhaltliches Verständnis von Formeln) und den empirischen Erkenntnissen über die Fähigkeiten von SchülerInnen wirft die Frage auf, welche Interpretationsangebote LehrerInnen ihren SchülerInnen im Physikunterricht machen, auf welche Weise im Physikunterricht mit und über Formeln gesprochen wird. Dieser Frage widmet sich die hier vorliegende Arbeit.

Theoretisch ordnet sich diese Arbeit somit in die Themengebiete „Mathematik im Physikunterricht“ und „Sprache im Physikunterricht“ ein. Da im Bereich der Sprache von LehrerInnen bisher keine Arbeiten bekannt sind, in denen Lehrersprache im Unterricht in Hinblick auf die Vermittlung von Formeln analysiert wurde, handelt es sich um physikdidaktische explorative Grundlagenforschung, für die sich ein qualitativer Forschungsansatz anbietet. Mit Hilfe einer qualitativen Ausrichtung soll zunächst beschrieben werden, welche Aspekte das Sprechen mit und über Formeln im Physikunterricht umfasst. Die Arbeit fokussiert sich auf die Perspektive der Lehrenden.

Zielstellung dieser Arbeit ist es, aufzuschlüsseln, wie LehrerInnen im Unterricht über Formeln sprechen und welche Interpretationsangebote sie mit ihrem Sprechen den SchülerInnen explizit und auch implizit geben.

Basierend auf theoretischen Überlegungen soll mit einem Ebenenmodell der Versprachlichung von Formeln (Kap. 5) ein erstes Beschreibungsinstrument für das Sprechen mit und über Formeln entwickelt werden. Durch die Analyse von Lehrersprache, die im Rahmen von Hospitationen im Physikunterricht der Klassenstufe 8 aufgezeichnet wurde, soll am Beispiel des elektrischen Widerstandes das Sprechen von LehrerInnen beschrieben werden. Mit Hilfe der Methode der qualitativen Inhaltsanalyse wird dieses Sprechen kategorisiert und beschrieben.

1.2. Aufbau der Arbeit

Diese Arbeit gliedert sich im Wesentlichen in drei Abschnitte: Theorie, Methodik und Ergebnisse. Die Gliederung ist in Abbildung 1.1 dargestellt.

Der Theorieteil befasst sich in Kapitel 2 zunächst mit einigen grundlegenden Überlegungen zur Bedeutung der Mathematik für die Physik. Hier soll ein grober Überblick gegeben werden, um die Bedeutung der Mathematik für die Wissenschaft Physik zu vermitteln. Für eine ausführlichere Behandlung dieser Thematik sei an dieser Stelle auf

Krey (2012) verwiesen. Hieran anschließend wird in Kapitel 3 zusammengetragen, wie sich dieses besondere Verhältnis der Mathematik und der Physik im Physikunterricht widerspiegelt und was dies für das Unterrichten von Physik bedeutet. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf der Darstellungsform der Formel, ihrer Rolle im Physikunterricht und aus der empirischen Forschung bekannten Lernschwierigkeiten, die den Umgang mit und das Verständnis von Formeln betreffen. In Kapitel 4 werden fachdidaktische Grundlagen und Erkenntnisse zum zweiten inhaltlichen Pfeiler dieser Arbeit dargelegt: Der verbalen Kommunikation im Physikunterricht. Hierbei sollen insbesondere auch unterschiedliche sprachliche Varietäten (Alltagssprache, Unterrichtssprache und Fachsprache) und ihre Rolle für das Lernen von Physik beleuchtet werden. Um das Zusammenwirken von Formeln und verbaler Sprache beschreiben zu können, wurde aus der Theorie ein Modell entwickelt, das die Versprachlichung von Formeln in insgesamt 7 Ebenen beschreibt (vgl. Abb. 5.6). Dieses Modell baut auf bekannten grundlegenden Klassifikationen von Darstellungsformen im Physikunterricht und sprachwissenschaftlichen Überlegungen zur Schichtung von Fachsprachen (n. Lothar Hoffmann, 1987) auf, die in Kapitel 5.1 beziehungsweise 5.2 beschrieben werden.

Insbesondere bei qualitativen Forschungsarbeiten ist es für eine gute Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse relevant, den methodischen Zugang und das methodische Vorgehen darzustellen. Aus diesem Grund widmet sich der Abschnitt II der Methodik dieser Arbeit. In Kapitel 7 werden zunächst der methodische Zugang und die Forschungsfragen beschrieben, anschließend werden in Kapitel 8 die Ergebnisse zweier Vorstudien zur Validierung und Verbesserung des Ebenenmodells der Versprachlichung von Formeln vorgestellt. Kapitel 9 widmet sich der Beschreibung der Auswertungsmethode (qualitative Inhaltsanalyse nach Kuckartz (2016)). Es folgen eine Beschreibung der Stichprobe in Kapitel 10 und Betrachtungen zur Güte dieser Studie in Kapitel 11.

In Abschnitt III werden die empirischen Ergebnisse dieser Arbeit dargestellt. Die Ergebnisse werden jeweils punktuell mit den theoretischen Betrachtungen verknüpft. Schwerpunkte dieser Verknüpfungen werden in Abbildung 1.1 durch Pfeile dargestellt. In Kapitel 12 werden zunächst die Ergebnisse der qualitativen Inhaltsanalyse der Unterrichtstranskripte dargestellt. Die Kategorien, die das Sprechen der LehrerInnen in Bezug auf Formeln darstellen, werden beschrieben und mit Rückbezug auf die Theorie und in Hinblick auf ihre Häufigkeiten ausgewertet. Es folgt in Kapitel 13 eine Analyse der Ergebnisse mit Hilfe des Ebenenmodells. Das Ebenenmodell hilft somit, die Ergebnisse zu strukturieren. Außerdem ermöglicht es, die verwendeten sprachlichen Varietäten der LehrerInnen zu ermitteln und das Sprechen von LehrerInnen zu charakterisieren (Kap. 13.3). In Kapitel 14 werden die Ergebnisse zusammenfas-

send interpretiert. Kapitel 15 interpretiert einige Ergebnisse in Hinblick auf einen eher technischen (Fokus auf mathematische Handhabung von Formeln) und strukturellen (inhaltvolle Verknüpfung von Mathematik und Physik) Umgang mit Formeln (n. Pietrocola (2008), vgl. Kap. 3.2).

Abschließend werden die Ergebnisse in Kapitel 16 zusammengefasst und die Forschungsfragen beantwortet. Es wird ein Ausblick mit Anknüpfungs- und Fortführungsmöglichkeiten zu dieser Arbeit gegeben (Kap. 17) und in Kapitel 18 einige Überlegungen präsentiert, welche Relevanz diese Arbeit für den praktischen Physikunterricht hat und wie erste Erkenntnisse in der Aus- und Weiterbildung von LehrerInnen Eingang gefunden haben und finden können.

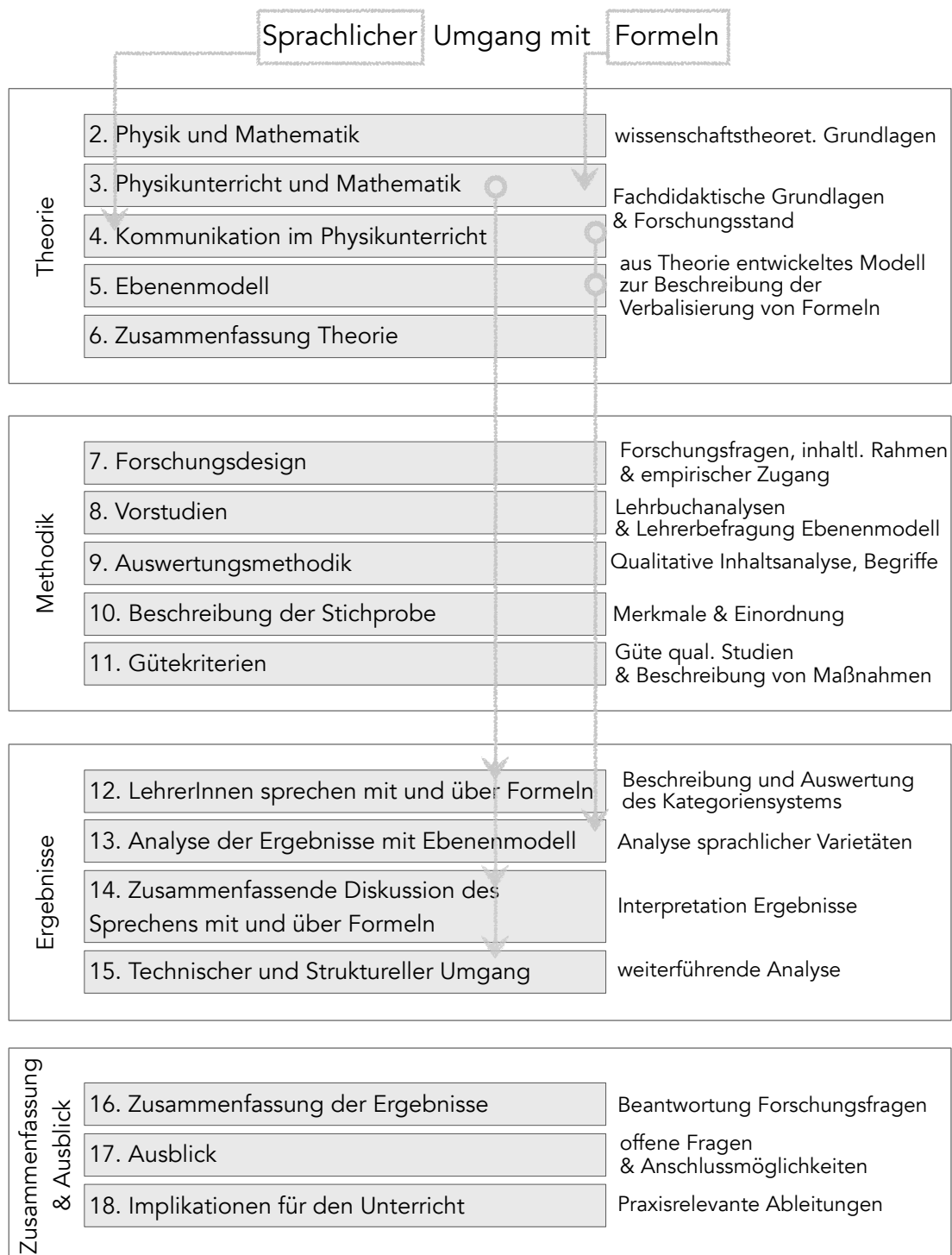


Abbildung 1.1.: Aufbau der Arbeit

Teil I.

**Theoretische Grundlage und
Forschungsstand**

2. Physik und Mathematik

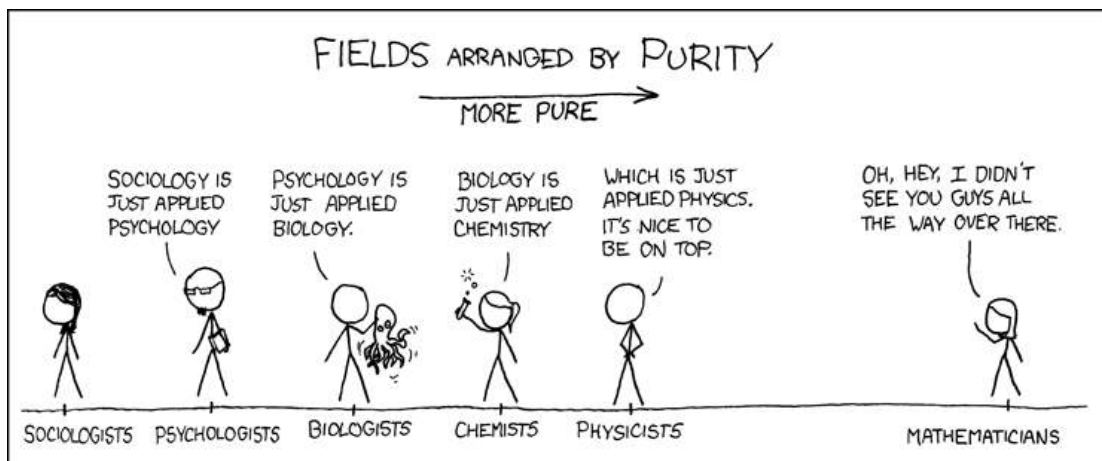


Abbildung 2.1.: Wissenschaften sind unterschiedlich, hier dargestellt in einem Comic von xkcd.com (Munroe, 2008)

Mathematik stellt in vielerlei Hinsicht innerhalb des wissenschaftlichen Diskurses eine Art Messlatte für Wissenschaftlichkeit dar. Wie wissenschaftlich eine Disziplin von außen wahrgenommen wird und auch wie das Selbstbild einer Wissenschaft ist, kann häufig in Verbindung zum Grad ihrer Mathematisierung gesehen werden. Überhöht stellt dies das Comic in Abbildung 2.1 dar, in dem Disziplinen nach ihrer „Reinheit“ geordnet abgebildet sind. Physik ist ohne Mathematik längst nicht mehr denkbar. PhysikerInnen bestimmen messbare Observablen, die sie in Experimenten mit Zahlenwerten verknüpfen und mit Hilfe mathematischer Relationen miteinander in Beziehung setzen.

Das Verhältnis von Physik und Mathematik ist Teil von wissenschaftstheoretischen und erkenntnistheoretischen Reflexionen über die Physik, wie sie als Aspekt der Vermittlung von „Nature-of-Science“ für den Physikunterricht Relevanz hat. Dieses Verhältnis beschäftigte und beschäftigt noch immer WissenschaftstheoretikerInnen, aber auch zahlreiche LehrerInnen, die in ihrem Berufsalltag mit der Situation konfrontiert sind, dass sie physikalische und mathematische Inhalte vermitteln müssen, und auch praktizierende PhysikerInnen, die über die so verblüffend fruchtbar erscheinende Ver-

knüpfung der Physik mit der Mathematik reflektieren. Nicht zuletzt wird die besondere Rolle der Mathematik für die Physik und den Physikunterricht mit ihren positiven Konsequenzen für die Wissenschaft aber auch ihren individuellen Lernschwierigkeiten als relevant für das Lernen von Physik wahrgenommen und erfährt auch in der physikdidaktischen Forschung erfreulicher Weise immer mehr Beachtung.

Im Folgenden soll ein Einstieg in das Thema über unterschiedliche Statements gegeben werden, die wesentliche Aspekte der Rolle der Mathematik für die Physik, aber auch unterschiedliche Ausprägungen der Meta-Diskussion über das Thema aus dem Fach Physik heraus exemplarisch aufzeigen. Anschließend sollen aus theoretischen Überlegungen der Physikdidaktik heraus die Rolle und die Funktionen der Mathematik innerhalb der Physik dargestellt werden (Kap. 2.1.3). Von besonderem Interesse für die Arbeit ist die Sichtweise der Mathematik als „Sprache“ der Physik, die in Kapitel 2.1.4 diskutiert wird.

Was ist nun aber das Besondere am Verhältnis von Physik und Mathematik? Wigner (1960) formuliert in seinem vielbeachteten Artikel „The Unreasonable Effectiveness of Mathematics in the Natural Sciences“:

„The miracle of the appropriateness of the language of mathematics for the formulation of the laws of physics is a wonderful gift which we neither understand nor deserve.“ (Wigner, 1960, o.S.)

Dieses Zitat drückt die Verwunderung darüber aus, dass die von Menschen erdachte Struktur der Mathematik so gut geeignet ist, die Natur zu beschreiben. Diese Verwunderung resultiert daraus, dass Physik und Mathematik zunächst unabhängig voneinander existieren. Auch wenn wir heute Mathematik mit einer gewissen Selbstverständlichkeit in der Physik und auch vielen anderen Wissenschaften nutzen, sind beide Wissenschaften von ihren Grundideen her doch unterschiedlich.¹

Etwas provokant beschreibt Feynman (1997) diesen Unterschied zwischen Mathematik und Physik:

„Die Mathematiker befassen sich nur mit der Struktur der Schlußfolgerungen; worüber sie reden, kümmert sie im Grunde wenig. (...) Mathematiker bereiten abstrakte Schlußfolgerungen vor, deren man sich bloß bedienen braucht, wenn man eine Reihe von Axiomen über die reale Welt aufstellt. Der Physiker dagegen verbindet mit all seinen Sätzen eine Bedeutung -

¹Eine gründliche wissenschafts- und erkenntnistheoretische Beschreibung und Reflexion der beiden Disziplinen ist für die Fragestellung dieser Arbeit nicht notwendig, einen guten Einstieg bieten aus physikdidaktischer Sicht die Arbeiten von Krey (2012) und Galili (2018), auf die für eine detailliertere Betrachtung an dieser Stelle verwiesen sei.

ein äußerst wichtiger Umstand, den Physiker, die von der Mathematik her kommen, oft nicht richtig einschätzen. Physik ist nicht Mathematik und Mathematik ist nicht Physik. Eine hilft der anderen. Aber in der Physik müssen Sie den Zusammenhang zwischen Wörtern und wirklicher Welt begreifen.“ (Feynman, 1997, S. 72)

Ähnlich drückt es Dirac (1939) aus, der in seinem Artikel „The Relation between Mathematics and Physics“ das Verhältnis der beiden Wissenschaften anhand mehrerer Beispiele aus der Physik beschreibt:

„Pure mathematics and physics are becoming ever more closely connected, though their methods remain different. One may describe the situation by saying that the mathematician plays a game in which he himself invents the rules while the physicist plays a game in which the rules are provided by Nature, but as time goes on it becomes increasingly evident that the rules which the mathematician finds interesting are the same as those which Nature has chosen.“ (Dirac, 1939)

Diese Idee, dass die Natur der Mathematik folgt oder andersherum gesprochen die Mathematik geeignet ist, die Natur adäquat zu beschreiben, zeigt sich auch in der vielzitierten Aussage Galileo Galileis:

„Das Buch der Natur ist in der Sprache der Mathematik geschrieben.“
(Galilei (1896, S. 232) zit. n. Krey (2012, S. 38))

Während im Zitat von Wigner (1960) also das Staunen überwiegt, drückt das Zitat von Galilei auf gewisse Art eine Selbstverständlichkeit aus. Wenn die Natur mathematisch ist, dann ist die Mathematik selbstverständlich die geeignete Sprache, um sie zu lesen, zu beschreiben und zu verstehen. Krey (2012) fasst diese und ähnliche Überlegungen unter dem Begriff „Anwendungsproblem“ zusammen, das eine philosophische Reflexion der Passung von Naturbeobachtung und Mathematik meint. Auch wenn diese Betrachtungen hier nicht im Detail wiedergegeben werden sollen, ist es doch relevant, sich dieses scheinbare „Wunder“ der Anwendbarkeit der Mathematik für die Physik vor Augen zu halten und einen Schritt von der eigenen Selbstverständlichkeit, mit der PhysikerInnen und PhysiklehrerInnen Mathematik nutzen, zurückzutreten. Erst diese Distanz ermöglicht es auch, die Perspektive von SchülerInnen auf die wundersame Verknüpfung von Mathematik und Physik nachzuvollziehen und ihnen eine Perspektive auf Mathematik in der Physik zu ermöglichen, die jenseits von Schwierigkeiten mit Rechnungen und Formalismen liegt.

2.1. Rolle und Funktionen der Mathematik in der Physik

„It almost seems that the ‚language‘ of mathematics we use in physics is not the same as the one taught by mathematicians. There are many important differences in what seems to be the physicist’s ‚dialect‘ of speaking math [...]. The key difference is that loading physical meaning onto symbols does work for physicists and leads to differences in how physicists and mathematicians interpret equations. We not only *use math in doing physics*, *we use physics in doing math*.“ (Redish und Kuo, 2015, S. 563)

Was macht die Mathematik mit der Physik? Warum nutzen wir mathematische Beschreibungen in der Physik? Ist Physik „nur“ angewandte Mathematik oder wird Mathematik in der Physik nur als Hilfsmittel zur Erkenntnisgewinnung genutzt? Aus dem obigen Zitat werden gleich mehrere relevante Punkte ersichtlich. Zunächst ist die Mathematik in der Physik keine reine Anwendung der Mathematik auf einen Inhalt. Die Mathematik selbst verändert sich zum Teil durch die physikalische Bedeutungsladung der Symbole, aber auch durch unterschiedliche Konventionen bei mathematischen Notationen und dem Nutzen mathematischer Prozesse innerhalb der Physik. Andererseits scheinen Physik und Mathematik so eng miteinander verwoben zu sein, dass nicht deutlich ist, ob Mathematik für Physik genutzt wird oder umgekehrt. Die Beziehung zwischen den beiden Fächern ist also wechselseitig. Galili (2018) spricht in diesem Zusammenhang auch von Physik und Mathematik als „Interwoven Disciplines“. Er entwirft ein *discipline-culture-model*, in dem jede Disziplin durch ihren *Kern* („nucleus“: das Fundament der Disziplin: Prinzipien, paradigmatische Modelle, grundlegende ontologische und epistemologische Konzepte), *Körper* („body“: Wissenselemente, die durch das Fundament konstruiert wurden; empirische Regelmäßigkeiten) und *Randbereich* („periphery“: alternative Konzepte, Ideen und Konstrukte, die im Konflikt zum *Kern* stehen) beschrieben wird. Mathematik und Physik teilen nach Galili (2018, S. 22) bestimmte Methoden, die zum *Körper* ihrer Disziplinen gehören, im *Kern* sind sie aber verschieden (vgl. Abb. 2.2). Die Unterschiede der beiden Disziplinen werden durch die in der Tabelle 2.1 gelisteten Merkmale deutlich. Diese Unterschiede der beiden doch so eng verwandten Disziplinen drückt auch das folgende Zitat von Albert Einstein aus:

„As far as the laws of mathematics refer to reality, they are not certain; and as far as they are certain, they do not refer to reality.“ (zit. nach Galili, 2018, S. 20)

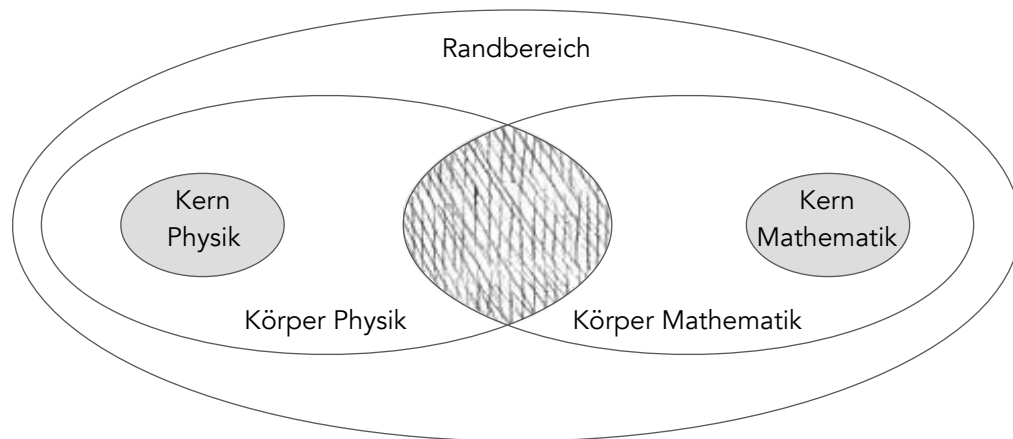


Abbildung 2.2.: Physik und Mathematik dargestellt im *discipline-culture-model* nach Galili (2018, S. 22-23)

	Mathematik	Physik
Gegenstand	abstrakte, streng definierte Objekte einer imaginierten Welt	reale Objekte der komplexen realen Welt
Ziel	untersucht Eigenschaften und Beziehungen zwischen Objekten	entwickelt Theorien, die reale Welt in Bezug auf ihre Ordnung, Regelmäßigkeit und Kausalzusammenhänge beschreiben
prinzipielles Vorgehen	geht streng regelgeleitet vor (Logik)	wenn nötig, flexibler Umgang mit Regeln
Methodik	Beweise	Experimente, Empirie, theor. (mathematische) Ableitungen
Ergebnis	System aus Axiomen	Modelle, Idealisierungen, Näherungen

Tabelle 2.1.: Beschreibung des Kerns der Disziplinen Mathematik und Physik ergänzt nach Galili (2018, S. 21-22)

2.1.1. Folgen der Mathematisierung für die Wissenschaft Physik

Geschichtlich gesehen ist die enge Verknüpfung der Physik mit der Mathematik im Grunde ein recht junges Phänomen, das die Physik als Wissenschaft stark verändert hat. Ein Blick auf diese Entwicklung lohnt sich, um den Einfluss der Mathematik auf die Physik besser zu verstehen.

Pereira de Ataíde und Greca (2013) machen drei historische Entwicklungsschritte der Physik aus, in denen sich die Beziehungen zwischen Physik und Mathematik veränderten: Zunächst wurde Mathematik genutzt, um Analogien zwischen physikalischen Objekten in der realen Welt und Strukturen in einer idealen Welt zu beschreiben. Mathematik fungiert hier also als Verknüpfung zwischen (physikalischem) Modell und Wirklichkeit. In einer nächsten Stufe bestimmt die Physik, wie die reale Welt funktioniert und Mathematik stellt eine gut funktionierende Sprache zur Verfügung, um diese Realität zu beschreiben. In der aktuellen Physik spielt die Mathematik eine sehr zentrale Rolle. Mathematische Überlegungen führen zu neuen physikalischen Erkenntnissen, Mathematik bestimmt darüber, wie „gute“ physikalische Konzepte und Gesetze konstruiert werden (vgl. Pereira de Ataíde und Greca, 2013, S. 1409). Die Rolle der Mathematik wird also im Laufe der geschichtlichen Entwicklung der Physik immer zentraler, Mathematik und Physik erscheinen als immer enger miteinander verknüpft, sodass heutzutage physikalische und mathematische Arbeitsweisen innerhalb der Physik kaum noch voneinander zu trennen sind.

Was aber macht dieser große Einfluss der Mathematik auf die Physik mit der Physik als Wissenschaft? Gingras (2001) beschreibt drei (unbeabsichtigte) Folgen dieser Mathematisierung, insbesondere nach der einflussreichen Veröffentlichung von Newtons „*Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*“ (1678): Als **soziale Folge** der Mathematisierung nennt er die Entdemokratisierung der Physik, die nun nur noch denen zugänglich ist, die Mathematik beherrschen:

„Thus, (...) mathematics contributed to the rise of a ‚private science‘, accessible only to the adequately trained. The outsiders, having to content themselves with a superficial understanding of what was really going on, could no longer be considered legitimate active participants and contributors to a now esoteric (as opposed to exoteric) field of knowledge.“ (Gingras, 2001, S. 393)

Als **epistemologische Folge** beschreibt Gingras (2001, S. 398-403) die Veränderung dessen, was innerhalb der Physik als eine Erklärung angesehen wird, weg von verbalen

(mechanischen) Beschreibungen, hin zu mathematischen (dynamischen) Beschreibungen im Sinne einer Ursache-Wirkungs-Relation.

Die dritte Folge ist als **ontologische Folge** das Verschwinden von Substanzen und stattdessen ein verstärktes Auftreten von abstrakten Beschreibungen. Ein Beispiel für eine substanzielle Erklärung ist die Äthertheorie, die Mitte des 19. Jahrhunderts von der Maxwellschen Theorie der Elektrodynamik, ausgedrückt in den Maxwell-Gleichungen, verdrängt wird (vgl. Gingras, 2001, S. 403-405).

Die Mathematik hat somit einen großen Einfluss auf die physikalische Erkenntnisgewinnung und die Struktur physikalischen Wissens. Gleichsam brachte sie von Beginn an ein Problem mit sich, das mit fortlaufender Entwicklung der Wissenschaft Physik und damit einhergehender wachsender Mathematisierung und Abstraktheit immer größer wurde: (mathematische) Physik ist nicht für jeden verständlich und zugänglich. Es bedarf mathematischer Kenntnisse und Fähigkeiten, um physikalische Erkenntnisse zu verstehen und physikalische Arbeitsweisen zu beherrschen. Was dies für den Vermittlungskontext des Physikunterrichts bedeutet, soll in Kapitel 3 näher beschrieben werden.

2.1.2. Funktionen der Mathematik in der Physik

Die Integration mathematischer Arbeitsweisen, Methoden und Theorien in die Physik erleichtert in vielen Punkten die Arbeit von PhysikerInnen und erfüllt damit bestimmte Funktionen. Krey (2012) nennt als Funktionen die kognitive Entlastung, Kommunikation, Exaktheit und Objektivität. In Krey und Karam (2016) werden zusätzlich noch die Funktionen Idealisierung und Ästhetik genannt. Diese Funktionen können uns Hinweise darauf geben, warum und wozu auch Formeln als zentraler Bestandteil der Mathematisierung in der Physik und im Physikunterricht benötigt werden. Sie gehören zum Metawissen über die Darstellungsform Formeln (s. Kap. 3.1) und können helfen, Formeln und ihre Aussagen, sowie die Art ihrer Aussagen besser zu verstehen.

Kognitive Entlastung Mathematik bietet der Physik eine Möglichkeit, Abstraktes zu materialisieren, indem sie für nicht mit den Sinnen wahrnehmbare Dinge ein Zeichensystem liefert. Mit Hilfe dieses Zeichensystems können PhysikerInnen nun mit der Repräsentation abstrakter Begriffe arbeiten (sie miteinander in Beziehung setzen, manipulieren), ohne explizit die abstrakte Bedeutung im Detail kommunizieren oder sie mitdenken zu müssen. Dies entlastet kognitiv und macht Abstraktes „handhabbar“. (vgl. Krey, 2012, S. 55-56) ²

²Krey (2012) bezieht sich in diesem Punkt auf Fischer (2006)

Kommunikation Eng verknüpft mit der ersten Funktion ist die Funktion der Kommunikation. Denn die Materialisierung und Darstellung abstrakter Konzepte macht es „für Eingeweihte“ (Krey, 2012, S. 58) möglich, über diese zu kommunizieren. Auch die Idealisierung erleichtert eine Kommunikation, da sie helfen kann „auf Wesentliches [zu] fokussieren und unwesentliche Aspekte auszublenden“ (Krey, 2012, S. 68). Ähnlich wie Fachsprache generell (vgl. auch Kap. 4.2) vereinfacht Mathematik die Kommunikation, da sie gewährleistet, dass Informationen präzise kommuniziert werden können, ohne dass alle Aspekte eines Konstruktes explizit beschrieben werden müssen. Dies gilt selbstverständlich nur unter der Prämisse, dass alle KommunikationspartnerInnen das Zeichensystem der Mathematik beherrschen. (vgl. Krey, 2012, S. 58-59)

Exaktheit Mathematik ist durch die logisch-beweisende Methode und ein axiomatisch-deduktives Vorgehen geprägt. Sie unterliegt somit strengen logischen Schlussregeln und gilt als „exakte Wissenschaft par excellence“ (Krey, 2012, S. 57). Sie bietet der Physik somit ein Regelwerk eindeutig definierter Begriffe und Operationen, das auf die Physik übertragen die Möglichkeit einer exakten Arbeitsweise beinhaltet. Neben dieser Exaktheit der Argumentation bietet die Quantifizierung und die damit einhergehende Prognostizierbarkeit einen weiteren Genauigkeitsanspruch. (vgl. Krey, 2012, S. 57-58)

Objektivität In Bezug auf Frey (1967) gewährleistet die Mathematik, dass Physik weitestgehend intersubjektiv und damit objektiv ist, da sie Inhalte kommunizierbar und nachprüfbar macht (vgl. Krey, 2012, S. 55-60). Gemeinsam mit dem Punkt der Exaktheit trägt Mathematik also dazu bei, wesentliche Aspekte der Wissenschaftlichkeit in der Physik zu gewährleisten und Kriterien der Wissenschaftlichkeit (Exaktheit, Objektivität) in innerhalb der wissenschaftlichen Community anerkannter Weise überprüfbar zu machen.

Idealisierung Wenn (physikalische) Objekte oder Inhalte mit mathematischen Darstellungsformen repräsentiert werden, konzentriert sich diese mathematische Repräsentation auf bestimmte Eigenschaften des Objektes. Die Repräsentation selektiert somit relevante Informationen von für den Kommunikationszusammenhang irrelevanten Informationen und stellt eine Idealisierung dar (vgl. Krey und Karam, 2016, S. 13). Diese generelle Eigenschaft von Repräsentationen wird auch in Abschnitt 3.1 beschrieben. Damit stellt die Mathematik ein wesentliches Werkzeug für Modellierungen dar, die als eine grundlegende Methode der Physik angesehen werden können.

Ästhetik Krey und Karam (2016, S. 13) nennen als zusätzliche Funktion die Ästhetik mathematischer Ausdrücke beispielsweise im Sinne von Einfachheit oder Symmetrie. Viele MathematikerInnen und PhysikerInnen sprechen von der „Schönheit“ mathematischer Ausdrücke. Beispielfhaft sei hier Paul Dirac zitiert: „Heute scheint es mir, daß der beste Ausgangspunkt, den man in der Physik haben kann, in der Annahme liegt, daß physikalische Gesetze auf schönen Gleichungen beruhen. Die einzige wirklich bedeutende Anforderung ist, daß die zugrunde liegenden Gleichungen von ausgeprägter mathematischer ‚Schönheit‘ sein sollten.“ (Dirac, 1977) Mathematik kann also dazu beitragen, dass Physik eine „schöne Wissenschaft“ ist und kann der Erfüllung ästhetischer Ansprüche dienen. Es scheint jedoch zweifelhaft, ob dieser Aspekt auch von Laien, wie SchülerInnen, wahrnehmbar ist oder vielmehr eingeweihten ExpertInnen vorbehalten bleibt.³

Mathematik übernimmt innerhalb der Physik somit verschiedene wichtige Funktionen, macht Physik wissenschaftlich und kommunizierbar und prägt sie in vielerlei Hinsicht. Dabei kann ihr Verhältnis zur Physik und die Rolle, die sie in der Physik einnimmt, unterschiedlich interpretiert werden. Verschiedene Sichtweisen auf dieses Verhältnis sollen im folgenden Abschnitt diskutiert werden. Was diese Rolle für Vermittlungskontexte von Physik bedeutet, wird in Kapitel 3.2 konkretisiert.

2.1.3. Rolle der Mathematik in der Physik

Welche Rolle nimmt die Mathematik in der Physik und für die Physik ein? Ist Mathematik Hilfswissenschaft der Physik? Oder ist Physik ein Anwendungsfeld der Mathematik? Ist sie keins von beidem oder etwas dazwischen? Feynman (1997) beschreibt die Verknüpfung von Mathematik und Physik folgendermaßen: „Mathematik ist eben *nicht* allein eine andere Sprache. Mathematik ist eine Sprache plus Schlußfolgerungen; sie ist gleichsam eine Sprache plus Logik. Mathematik ist ein Werkzeug, um Schlüsse zu ziehen.“ (Feynman, 1997, S. 54) Zum einen benennt Feynman Mathematik hier explizit als Werkzeug, um Physik treiben zu können. Zum anderen nutzt er aber auch die weitverbreitete Metapher von Mathematik als Sprache der Physik. Es wird deutlich, dass Sprache nicht nur Wörter zur Verfügung stellt, um etwas zu benennen, sondern im konstruktivistischen Sinne beeinflusst, was wir wahrnehmen und wie wir es beschreiben und erklären (können). Pereira de Ataíde und Greca (2013) unterscheiden drei mögliche Sichtweisen auf die Rolle der Mathematik in der Physik:

³Einen übersichtlichen Einstieg in das Thema der mathematischen Schönheit in der Physik bietet Primas (2001).

- Mathematik als Werkzeug (*tool*)
- Mathematik als Sprache (*translator*)
- Mathematik als strukturgebendes Element (*structure*)

Wird *Mathematik als Werkzeug* der Physik gesehen, dann dient sie dazu, numerische Kalkulationen durchzuführen. Diese mathematischen Operationen helfen, physikalische Konzepte zu verifizieren (vgl. Pereira de Ataíde und Greca, 2013, S. 1413). In diesem Sinn sind Physik und Mathematik nicht wirklich miteinander verknüpft, mathematische Fähigkeiten werden vielmehr auf physikalische Probleme angewendet, um diese zu lösen, beeinflussen aber die Struktur der Probleme selbst nicht. Die mathematischen Fähigkeiten, die benötigt werden, können losgelöst von der Physik erworben werden und werden von Pietrocola (2008) als technische Fähigkeiten („technical skills“) bezeichnet (s. Kap. 3.2). Eine alleinige Vorstellung der Mathematik als Werkzeug ist nicht angemessen, da sie stark vereinfachend ist (vgl. Pereira de Ataíde und Greca, 2013; Pietrocola, 2008).

Im Gegensatz dazu beeinflusst Mathematik in ihrer *strukturgebenden Rolle* physikalisches Denken und Arbeiten maßgeblich mit. Sie stellt das Fundament für physikalische Argumentationen dar, Physik und Mathematik gehen Hand in Hand („walk together“ Pereira de Ataíde und Greca, 2013, S. 1413). Diese Rolle spiegelt sich im Konzept der strukturellen Fähigkeiten („structural skills“) wider (vgl. Pietrocola, 2008). Mathematik wird nicht losgelöst vom physikalischen Kontext betrachtet. Diese Vorstellung, dass die mathematischen Strukturen den physikalischen Inhalt beeinflussen, findet sich beispielsweise auch bei Gingras (2001, S. 404): „the syntactical structure of the theory affected and constrained the semantic interpretation of its terms“ oder Galili (2018): „mathematical structure serves as a suggestive guide which may lead to a new understanding through abduction“. Das Bewusstsein dafür, dass mathematische Ausdrücke nicht losgelöst von ihrer physikalischen Interpretation gesehen werden sollten, findet sich bereits bei Faraday: „we shall endeavour to put our calculations into such a form that every step may be capable of some physical interpretation“ (Faraday, 1990b, S. 672).

Unter der *Rolle als Sprache* verstehen Pereira de Ataíde und Greca (2013) eine kommunikative Funktion. Mathematik dient als Darstellungsform und Manifestation physikalischer Inhalte. Mathematik nimmt in diesem Sinne eine sehr wichtige Rolle in der Mathematik ein, übersetzt physikalische Inhalte in Ziffern und Modelle, beeinflusst aber nicht die Strukturen der Physik. Diese Rolle als Sprache soll im Folgenden näher erläutert werden.

2.1.4. Mathematik als Sprache der Physik

Die Rolle der Mathematik als Sprache der Physik, wie sie unter anderem von Pereira de Ataíde und Greca (2013) beschrieben wurde, ist eng verwandt mit der in Abschnitt 2.1.2 beschriebenen kommunikativen Funktion der Mathematik in der Physik. Ähnlich wie beim Sprachenlernen muss das mathematische Zeichensystem in der Physik in seiner spezifischen Anwendung erlernt werden. Dabei gleicht das Lernen dieser Fachsprache eher dem Lernen der Muttersprache als dem Lernen einer Fremdsprache, da neben den Zeichen auch die Zeichenbedeutung gelernt und neu konstruiert werden muss. Wenn eine Schülerin beispielsweise Englisch lernt, dann lernt sie das Wort „tree“ als neues sprachliches Zeichen für das ihr bekannte Konzept „Baum“ (s. auch die sprachwissenschaftlichen Betrachtungen zur Semiotik von de Saussure, der in Zeicheninhalt und Zeichenausdruck unterscheidet, s. Kap. 4.1). Mathematik dient der Physik somit nicht nur als Kommunikationsmittel, um für bestehende Inhalte ein Zeichensystem zur Verfügung zu stellen, sie beeinflusst als Sprache in vielerlei Hinsicht die Art und Weise, in der Physik betrieben wird. In einer Beschreibung der Fachsprache der modernen Physik stellt Falkenburg (1999) diesen Einfluss der Mathematik auf die Physik dar: „Physikalische Theorien gelten als unanschaulich, denn sie sind in der abstrakten symbolischen Sprache der Mathematik formuliert. [...] Das mathematische und experimentelle Vorgehen der Physik führt fort vom Alltagsverständnis der Wirklichkeit, von der üblichen qualitativen Erfahrung des Geschehens um uns herum und von der natürlichen Sprache, in der wir unsere Erfahrungen sonst ausdrücken. Die Experimente der Physiker sind darauf angelegt, Phänomene zu erzeugen, die man klassifizieren und zum Gegenstand der mathematischen Physik machen kann.“ (Falkenburg, 1999, S. 89-90) Außerdem führt sie aus, physikalische Gesetze würden durch mathematische Symbole formuliert (Formeln), die physikalische Interpretation formaler Symbole erfolge durch Größenbegriffe und die Bedeutung physikalischer Begriffe sind keine konkreten Objekte, sondern liegen in einer Klasse physikalischer Eigenschaften, die oftmals durch numerische Skalen repräsentiert werden können (vgl. Falkenburg, 1999, S. 90). Dies zeigt deutlich, wie tief Mathematik als Sprache mit der Art, in der Physik betrieben wird, verwoben ist.

Formeln nehmen innerhalb dieser Sprache der Physik eine besondere Rolle ein, die Wagenschein (1962) betont, indem er die Wichtigkeit des behutsamen Heranführens der SchülerInnen an die Fachsprache und damit auch an Formeln beschreibt:

„[Es geht darum,] daß ein zu schnelles Versetzen des Schülers in die perfekten ‚quantitative‘ Maschinerie ihn um das Verständnis bringt, ihn um die Physik betrügt, die in der Formel steckt, die in ihr verdichtet und damit

auch dem nicht Verstehenden praktikabel gemacht ist. Der Umgang mit der Formel verlangt ja vom Menschen viel weniger als der Umgang mit der Sprache. [...] Natürlich soll mit alledem nichts gegen die quantitative Fassung physikalischer Aussagen in der Schule überhaupt gesagt sein. Nur: daß sie nicht in der Luft schweben darf“ (Wagenschein, 1962, S. 171 f.)

Wagenschein betont also die generelle Sensibilität gegenüber der Bedeutungslast einer Formel, die eine sehr hohe semantische Dichte aufweist (viel Inhalt auf sehr wenig Raum, s. auch. Kap. 3.3.2, Abb.3.4).

3. Physikunterricht und Mathematik

Wie in Kapitel 2 beschrieben, sind Physik und Mathematik eng miteinander verwoben und Physik ist ohne Mathematik nicht denkbar. Gleichzeitig ist es häufig die Mathematik, die Lernenden Schwierigkeiten bereitet. Feynman schreibt hierzu:

„Ein Jammer, daß es ausgerechnet Mathematik sein muß, und daß Mathematik manchen Leuten so schwerfällt. [...] Die Physik läßt sich in keine andere Sprache übersetzen. Wenn Sie etwas über die Natur erfahren wollen, müssen Sie sich der Sprache bedienen, die sie spricht.“ (Feynman, 1997, S. 75)

Wir können also nicht umhin, mathematische Darstellungen im Physikunterricht zu nutzen und mathematische Inhalte zu vermitteln. SchülerInnen müssen diese „Sprache der Natur“ aber erst lernen und benötigen dabei Hilfestellungen. Im Folgenden sollen didaktische Überlegungen und Erkenntnisse zur Mathematik und mathematischen Darstellungsformen und im Speziellen zu Formeln in Physikunterricht zusammengefasst werden. Für den Physikunterricht stellen sich in Bezug auf mathematische Darstellungsformen drei Fragen: Wie gehen LehrerInnen mit mathematischen Darstellungsformen in didaktischen Kontexten um (s. Kap. 3.3.3)? Was sollen SchülerInnen mit ihnen können (s. Kap. 3.3.4)? Und was bereitet SchülerInnen in Bezug auf mathematische Darstellungsformen besondere Schwierigkeiten (s. Kap. 3.3.5)? Bevor zentrale theoretische und empirische Ergebnisse der fachdidaktischen Forschung zu diesen drei Fragen dargestellt werden, soll eine theoretische Grundlage zu mathematischen Darstellungsformen im Physikunterricht gelegt werden (s. Kap. 3.1) und in einer übergeordneten Sichtweise die Rolle, die Mathematik im Physikunterricht einnimmt, reflektiert werden (s. Kap. 3.2).

Im Folgenden liegt der Fokus insbesondere auf Formeln, andere mathematische Darstellungen wie Graphen oder Tabellen werden an dieser Stelle nur am Rande thematisiert, wenn sie allgemeingültige Erkenntnisse ermöglichen oder Erkenntnisse auf Formeln übertragbar sind. Einen allgemeinen Überblick über den aktuellen Forschungsstand zum Thema Mathematik im Physikunterricht bieten Pospiech, Micheli und Eylon (2019).

3.1. Mathematische Darstellungsformen im Physikunterricht

In Kapitel 2 wurde insbesondere beschrieben, wie Mathematik als Wissenschaft mit den ihr eigenen Argumentationsmustern und erkenntnistheoretischen Grundlagen die Naturwissenschaft Physik beeinflusst und prägt. Im Physikunterricht sind diese Einflüsse ebenso vorhanden, werden jedoch selten explizit gemacht. Eine für SchülerInnen offensichtliche und sehr prägende Weise, in der Mathematik im Physikunterricht in Erscheinung tritt, sind neben diesen „Denkstrukturen“ mathematische Darstellungsformen. In einfachster Form sind dies Messwerte, die in numerischen Größen ausgedrückt werden. Diese werden beispielsweise in Tabellen notiert, dann in einen Graphen aufgetragen. Anschließend wird der empirische Zusammenhang der gemessenen Größen als Formel dargestellt, mit der dann konkrete Rechnungen durchgeführt werden können (s. Abb. 3.1).

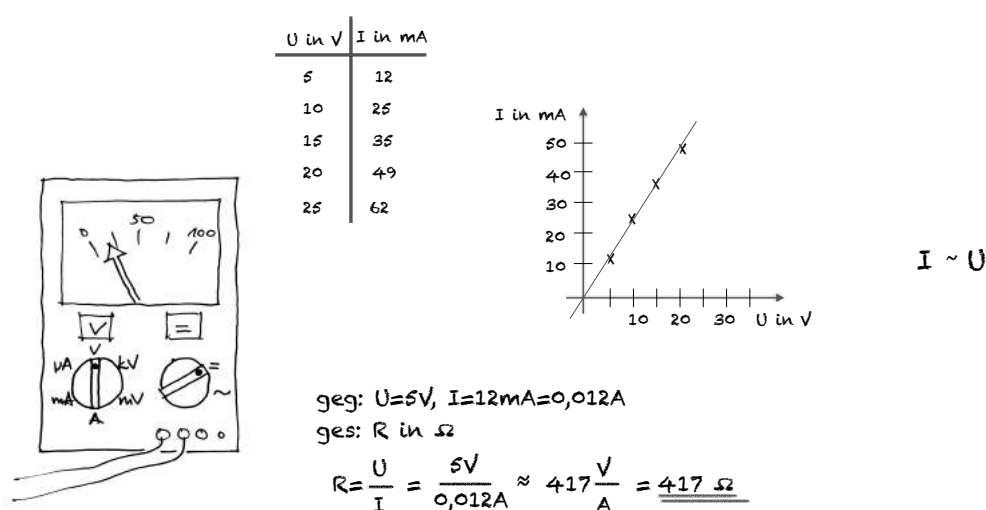


Abbildung 3.1.: Mathematische Darstellungsformen im Physikunterricht

In Kapitel 5.1 wird eine Klassifikation von Darstellungen im Physikunterricht präsentiert, die neben diesen reinen mathematischen Darstellungen, die SchülerInnen aus dem Mathematikunterricht häufig bereits bekannt sind, auch verbale, bildliche und gegenständliche Darstellungen umfasst (s. Abb. 5.2). Denn mathematische Inhalte werden auch durch verbale Sprache ausgedrückt, wenn diese einen mathematischen Zusammenhang beschreibt. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der rein mathematischen algebraischen Darstellungsform Formel und der Sprache als verbaler Darstellungsform.

Darstellungsformen sind immer auch Kommunikationsmittel, um Bedeutungen zu

vermitteln und auszuhandeln. Wenn eine Lehrkraft eine Darstellungsform nutzt, dann tut sie das mit einem (didaktischen) Kommunikationsziel: Sie möchte einen bestimmten physikalischen Inhalt darstellen und diesen SchülerInnen vermitteln. SchülerInnen auf der anderen Seite müssen lernen, fachtypische, also auch mathematische, Darstellungsformen zu lesen, um aus ihnen diese Inhalte erkennen zu können. Neben diesen rezeptiven Kompetenzen sollen sie im Sinne der Ausbildung einer physikalischen Arbeitsweise und Kommunikationskompetenz aber auch lernen, diese Darstellungsformen aktiv produktiv zu nutzen. Um dieses zu gewährleisten, ist auch ein Lernen *über* eine Darstellungsform relevant (vgl. auch Lemke, 2004), sie müssen eine „meta-representational competence“ entwickeln (diSessa, 2004). Um erfolgreich mit Darstellungsformen umzugehen und auch mit ihnen zu lernen, sollten SchülerInnen

- ...die äußere Form einer Repräsentation verstehen (also z. B. wie man Werte aus einem Graphen abliest oder wie man eine Formel umstellt oder einen unbekannten Wert mit Hilfe einer Formel berechnet).
- ...die Verknüpfung einer Darstellungsform mit ihrer fachlichen Domäne kennen (also z. B. welche Formelzeichen für welche Termini stehen).
- ...in der Lage sein, eine angemessene Darstellungsform auszuwählen (für ein bestimmtes Kommunikationsziel oder zur Lösung einer Aufgabe).
- ...eine Darstellungsform korrekt konstruieren können (z. B. einen Graphen zeichnen oder eine Formel aufstellen können).
- ...verschiedene Darstellungsformen miteinander verknüpfen können (also z. B. verstehen, wie ein Graph mit einer Formel zusammenhängt). (Vgl. Ainsworth, 2008, S. 199-204)

Grundsätzlich ist zu beachten, dass Darstellungen Informationen immer auch selektieren. Jede Repräsentation kann somit selbst als Interpretation verstanden werden, da sie bestimmte Informationen hervorhebt, andere weglässt und auch eine äußere Darstellung eines individuellen mentalen Modells ist.¹ Diese Darstellung zu lesen ist wiederum eine Interpretation der äußeren Darstellung vor dem Hintergrund des eigenen Vorwissens. Dies spricht dafür, einen Sachverhalt immer mit verschiedenen Darstellungsformen zu repräsentieren. Erst eine multimodale Repräsentation

¹In dieser Arbeit werden Darstellungen immer als externe Repräsentationen verstanden. Mentale Modelle oder interne Repräsentationen sind individuelle Modelle eines Sachverhalts, die jede Person kognitiv von einem Sachverhalt erzeugt (vgl. z. B. Greca und Moreira, 2001; Nitz und Fechner, 2018)

eines Sachverhaltes kann ein vollständiges Bild des Sachverhaltes selbst liefern. Lemke (2004) spricht in diesem Zusammenhang von unterschiedlichen „Sprachen einer Wissenschaft“, die SchülerInnen alle erlernen sollten, denn: „Scientific literacy is not just the knowledge of scientific concepts and facts; it is the ability to make meaning conjointly with verbal concepts, mathematical relationships, visual representations, and manual-technical operations“ (Lemke, 2004, S. 38). Die Verwendung unterschiedlicher Darstellungsformen kann aber auch didaktischen Zweck erfüllen und helfen, eine Darstellungsform mit Hilfe einer anderen zu verstehen (also z. B. Formeln mit verbaler Sprache erklären) oder ein tieferes Verständnis erzeugen, indem unterschiedliche Darstellungsformen miteinander verglichen und verknüpft werden (vgl. z. B. Ainsworth, 2008). Unterrichtspraktisch plädiert auch Leisen (2005c) für einen Wechsel verschiedener Darstellungsformen aus didaktischen, methodischen, lernpsychologischen und pädagogischen Gründen. Diese Überlegungen werden in Kapitel 4.4.3 mit besonderem Fokus auf die Vermittlung der physikalischen Fachsprache noch einmal näher erläutert.

Vor dem hier dargestellten theoretischen Hintergrund erscheint es sinnvoll und notwendig, SchülerInnen unterschiedliche Darstellungsformen eines Sachverhaltes in Vermittlungskontexten anzubieten, explizit auch das Lernen *über* Darstellungsformen wie Formeln zu fördern und SchülerInnen zu befähigen, selbst unterschiedliche Darstellungsformen zu konstruieren und zu nutzen.

3.2. Die Rolle der Mathematik im Physikunterricht

Aufgrund der dargestellten Relevanz, die mathematische Darstellungsformen für die Physik besitzen (s. Kap. 3.1), und aufgrund der engen Verwobenheit der Disziplinen Physik und Mathematik (s. Kap. 2) erscheint ein Physikunterricht gänzlich ohne Mathematik nicht sinnvoll. Interessanterweise scheinen Lehrende diese Relevanz der Mathematik für das Lernen von Physik stärker wahrzunehmen als die Lernenden selbst. Ornek, Robinson und Haugan (2007) befragten StudentInnen und Lehrbeauftragte der Physikfakultät dazu, was Physik schwierig mache. Hierauf nannten 24 der 25 befragten Lehrbeauftragten, dass Physik gute mathematische Kenntnisse verlange und 64% stimmten der Aussage zu, dass Physik nicht ohne mathematische Vorkenntnisse gelernt werden könne. Auf Seiten der Studierenden lag die Zustimmung nur bei 33% beziehungsweise 23%.² Dies deutet bereits darauf hin, dass Lernende und Lehrende die Rolle der Mathematik durchaus unterschiedlich wahrnehmen, was zu

²In der Erhebung wird zwischen Teaching Assistants und Faculty Members unterschieden. Hier wurden die Ergebnisse der beiden Gruppen für eine übersichtlichere Darstellung aufsummiert.

Schwierigkeiten im Lehr-Lern-Prozess führen kann.

Außerdem bleibt die Frage, wie mit der Mathematik beim Lernen der Physik umgegangen werden sollte. Zugespitzt sind zwei Ansätze denkbar, die im folgenden Problem dargestellt werden:

„Jedem, der Physik studiert, tritt ja ein sehr ernstes Dilemma entgegen. Er möchte Physik ‚verstehen‘, und er möchte Physik ‚handhaben‘ lernen, sie vielleicht sogar weiterbilden. Versucht er, alles zu verstehen, so kommt er nie dazu, es zu handhaben; beschränkt er sich auf das zweite (er muß ja an sein Weiterkommen im Beruf denken), so versteht er die Dinge nicht ganz, mit denen er umgeht.“ (Hund, 1972, S. 11)

Hund (1972) beschreibt damit aus wissenschaftstheoretischer Sicht ein Problem, das bereits in den unterschiedlichen Rollen der Mathematik in der Physik in Kapitel 2.1.3 angesprochen wurde. Für das Lernen von Mathematik und Physik hat diese unterschiedliche Sicht auf die Rolle der Mathematik eine große Relevanz: Sollen wir Mathematik als ein Werkzeug begreifen und auch vermitteln, um etwas Bestimmtes zu erreichen, oder sollen SchülerInnen „verstehen“ was sie tun und inhaltliche Bedeutungen mathematischer Operationen mitdenken? Mit dieser Frage beschäftigen sich verschiedene AutorInnen der Physikdidaktik und Mathematikdidaktik, die in Abbildung 3.2 zusammengestellt sind, und im Folgenden näher beschrieben werden.



Abbildung 3.2.: Ansätze zur Beschreibung einer technischen oder inhaltlichen Vermittlung von Mathematik

In der Mathematikdidaktik unterscheidet Skemp (1976) zwischen instrumentellem

und relationalem Verständnis („instrumental understanding“ und „relational understanding“). Während das instrumentelle Verständnis eine Kenntnis und das Anwenden von Regeln meint, bedeutet instrumentelles Verständnis, dass man versteht, warum man diese Regeln anwenden darf. Skemp (1976) vergleicht die unterschiedlichen Ansätze mit dem Einprägen von Wegen. Das instrumentelle Verständnis gleicht dem Einprägen einer Route, in der Form: „An der Haltestelle nach links abbiegen, dann zweite Straße rechts, am gelben Eckhaus nach rechts...“. Das relationale Verständnis ist vergleichbar mit der Konstruktion einer mentalen Karte einer Stadt. Mit einer solchen Karte kann man sich dann flexibel orientieren und auch neue Wege erkunden, ohne verlorenzugehen (vgl. Skemp, 1976, S. 94). Beide Herangehensweisen haben Vor- und Nachteile für das Lernen von Mathematik. Während instrumentelle Mathematik in der Regel einfacher zu verstehen ist, im Lernprozess zu schnelleren Erfolgen und auch in der Anwendung bei Aufgaben zu schnelleren Lösungen führt, ist die relationale Mathematik leichter auf neue Aufgaben übertragbar, leichter zu merken (da viele Regeln aus wenigen Grundprinzipien herleitbar sind) und sie ist als Lernziel selbst motivierend, da sie ein Verständnis für die Mathematik und ihre Strukturen selbst ermöglicht (vgl. Skemp, 1976, S. 92-93).

Eine ähnliche Unterscheidung trifft Sfard (2008) in ihrer kommunikationstheoretischen Beschreibung der Mathematik und des Lernens von Mathematik. Sie beschreibt drei Arten von Mathematik: 1. Explorative Mathematik („Explorations“): Das Aushandeln mathematischen Wissens durch Deduktion, Induktion und Abduktion (vgl. Sfard, 2008, S. 228-230). 2. Handelnde Mathematik („Deeds“): das konkrete, praktische mathematische Handeln mit Hilfe von Routinen im Sinne eines „set of rules for a patterned sequence of actions“ (Sfard, 2008, S. 236-237) und 3. Ritualisierte Mathematik („Rituals“): „sequences of discursive actions whose primary goal [...] is [...] creating and sustaining a bond with other people“ (Sfard, 2008, S. 241). Bei diesem dritten Vorgehen, der ritualisierten Mathematik, ist jeder Handlungsablauf strikt an eine bestimmte (auch soziale) Situation gebunden (z. B. einen Aufgabentypen im Mathematikunterricht), das Vorgehen erfolgt als Reproduktion strenger Handlungsanweisungen (vgl. Sfard, 2008, S. 244).

Im deutschsprachigen Raum ist außerdem der Ansatz von Prediger (2009) verbreitet, die zwischen formalem und inhaltlichem Denken unterscheidet. Während das formale Denken ein Kalkül meint, das mathematische Operationen als Regeln anwendet, beschreibt das inhaltliche Denken die Verknüpfung mathematischer Objekte mit der Welt (auch im Sinne der Grundvorstellungen von Hofe (1992), die in Kap. 3.3.2 beschrieben werden).

Diese Überlegungen sind auch für den Physikunterricht von großer Relevanz, da

physikalische Kontexte in besonderer Weise erfordern, dass mathematische Handlungen mit physikalischen Inhalten verknüpft werden. Diese Verknüpfung beschreibt beispielsweise Uhden (2012), indem er das mathematische Denken in der Physik modelliert. Er unterscheidet in seinem Modell die Bereiche der reinen Mathematik und das physikalisch-mathematische Modell. Es gibt somit innerhalb physikalischen Handelns Situationen, in denen wir rein mathematisch denken und handeln und physikalische Kontexte, Inhalte und Bedeutungen nicht mitdenken. Ein solches Handeln kann nach Pietrocola (2008) technisch genannt werden. Die Unterscheidung in technische und strukturelle Fähigkeiten begründet Pietrocola (2008) folgendermaßen:

„Two modes can be underscored by which teaching mathematics in physics allows learning the physical contents. The first one is grounded on the technical domain of mathematical systems, such as operations with algorithms, construction of graphics, solution of equations, etc. We consider such characteristics as being connected to the internal context of mathematical knowledge and will designate them as *technical skills*, in the sense of being able to deal with specific rules and properties of mathematical systems. The second one is based on the capacity of employing the mathematical knowledge for structuring physical situations. We consider such characteristic to be connected to the organizational use of mathematics in external domains and will designate them as *structural skills*.“ (Pietrocola, 2008, S. 7)

Es liegt auf der Hand, dass sich diese zwei Kompetenzbereich in keiner Weise ausschließen: Ein strukturelles Verständnis dessen, wie Mathematik und Physik miteinander verknüpft sind, ist ohne technische Fähigkeiten, das zu mathematisch-physikalischem Handeln befähigt, nicht möglich. Pietrocola (2008) warnt jedoch vor einer ausschließlichen Fokussierung auf technische Fähigkeiten. Auch in Hinblick auf die aus der Mathematikdidaktik vorgestellten Ansätze wird deutlich, dass ein inhaltliches Reflektieren der Mathematik in der Physik enorm wichtig ist, um physikalische Inhalte und Arbeitsweisen zu vermitteln. Zu diesen strukturellen Fähigkeiten gehören zum Beispiel das selbstständige Mathematisieren physikalischer Situationen, also der Prozess der Übersetzung von der physikalischen Welt in die Mathematik, das inhaltlich-konzeptuelle Interpretieren mathematischer Ausdrücke, das Herleiten physikalischer Gesetze und das Erkennen von Analogien, also das Erkennen formaler Ähnlichkeiten mathematischer Ausdrücke für verschiedene physikalische Konzepte (Karam, Pospiech und Pietrocola, 2011). Diese Unterscheidung in technische und strukturelle Fähigkeiten impliziert unterschiedliche Sichten auf die Rolle der Mathematik in

der Physik (technische und strukturelle Rolle), wie sie aus theoretischer beziehungsweise empirischer Sicht in Kapitel 2.1.3 und 3.3.3 (Abb. 3.6) beschrieben werden. Wenn im Folgenden von der technischen Rolle der Mathematik im Physikunterricht gesprochen wird, dann meint dies die Vermittlung, das Lernen und das Handhaben technischer mathematischer Fähigkeiten (z. B. eine Formel umstellen), die strukturelle Rolle bezieht sich auf die Vermittlung und das Lernen mathematischer Konzepte in der Physik unter Einbeziehung physikalischer Inhalte (z. B. das Interpretieren eines Rechenergebnisses).

Verschiedene Untersuchungen legen die Vermutung nahe, dass diese strukturelle Rolle der Mathematik im praktizierten Physikunterricht oft zu kurz kommt. So zeigt sich in qualitativen Labor- und Interview-Studien mit SchülerInnen des Sek-1-Bereichs bei der Beschreibung von Formeln eine Fokussierung auf eher technische als auf strukturelle Eigenschaften (Pospiech und Oese, 2013; Uhden, 2012). Highschool-SchülerInnen weisen Schwierigkeiten bei der inhaltlichen Beschreibung von Formeln (Bagno, Berger und Eylon, 2008) auf oder nutzen ein inhaltlich unreflektiertes „plug-and-chug“-Verfahren, wenn sie mit Formeln rechnen (Tuminaro und Redish, 2007). Uhden (2012) identifiziert außerdem verschiedene Probleme von SchülerInnen mit strukturellen Fähigkeiten und zum Teil einen schematisch-technischen Umgang und oberflächliche Übersetzungen zwischen Mathematik und Physik, die sich beim Lösen von Problemaufgaben zeigen. Hierzu zählt zum Beispiel auch der Umgang mit zusammengesetzten Einheiten oder falsche Vorstellungen zu Änderungsraten und zugehörigen mathematischen Konzepten. Eine andere Untersuchung von Bing und Redish (2009) mit StudentInnen zeigt, dass diese größere Schwierigkeiten beim Lösen von Problemen an den Tag legen, wenn sie bestimmte Strategien nutzen, die eher technisch als strukturell sind. Weitere Lernschwierigkeiten in Bezug auf Formeln werden in Kapitel 3.3.5 beschrieben.

Allein technische Fähigkeiten reichen somit nicht aus, um in Physik erfolgreich zu sein. Physikunterricht sollte in jedem Fall auch strukturelle Aspekte des Zusammenspiels von Mathematik und Physik thematisieren und strukturelle Fähigkeiten vermitteln.

3.3. Formeln im Physikunterricht

Nach diesen allgemeinen Betrachtungen über die Rolle der Mathematik im Physikunterricht soll nun die Frage beantwortet werden, welche Rolle Formeln im Physikunterricht einnehmen und welche Vorteile und Schwierigkeiten sie für das Lernen

von Physik bringen können. Redish (1994) beschreibt den von ihm empfundenen Zustand dessen, was seine StudentInnen als Physik (mit Formeln) wahrnehmen und im Kontrast dazu das Bild, das er selbst gerne vermitteln möchte, folgendermaßen:

„Most of our students do not know what you and I mean by ‘doing’ science or what we expect them to do. Unfortunately, the most common mental model for learning science in my classes seems to be:

- (a) Write down every equation or law the teacher puts on the board that is also in the book.
- (b) Memorize these, together with the list of formulas at the end of each chapter.
- (c) Do enough homework and end-of-the-chapter problems to recognize which formula is to be applied to which problem.
- (d) Pass the exam by selecting the correct formulas for the problems on the exam.
- (e) Erase all information from your brain after the exam to make room for the next set of material.

[...] I call the bulleted list above ‘the dead leaves model’. It is as if physics were a collection of equations on fallen leaves. One might hold $s = 1/2gt^2$, another $F = ma$, and a third $F = -kx$. These are each considered as of equivalent weight, importance, and structure. The only thing one needs to do when solving a problem is to flip through one’s collection of leaves until one finds the appropriate equation. I would much prefer to have my students see physics as a living tree!” (Redish, 1994, S. 799)

Ziel des folgenden Kapitels soll es sein, dieses Bild des lebendigen Baumes mit Inhalt zu füllen. So soll eine Grundlage dafür geschaffen werden, wie Formeln nicht als einzelne tote Blätter dargestellt werden, sondern ihre Vernetztheit untereinander und zur Physik selbst an Bedeutung gewinnt. Hierzu gehört ihre Rolle als Darstellungsform in der Physik, aber auch ihre jeweilige spezifische inhaltliche Verknüpfung mit physikalischen Theorien.

Formeln sind eine wichtige fachtypische Darstellungsform der Physik. Dies begründet auch ihre Relevanz für den Physikunterricht, die sich implizit auch in den Bildungsstandards der KMK für den mittleren Schulabschluss in den Kompetenzbereichen

Fachwissen, Erkenntnisgewinnung, und Kommunikation spiegelt.³ Die bundesland-spezifischen Lehrpläne für das Fach Physik setzen diese allgemeinen Forderungen sehr unterschiedlich um. Die Lehrpläne des Landes Sachsen fordern bereits in unteren Klassenstufen einen recht hohen Grad an Mathematisierung, der sich in den Lehrplänen explizit durch die obligatorische Behandlung von Formeln zeigt. So fordert der zum Zeitpunkt der Erhebung gültige Lehrplan für das Fach Physik am Gymnasium bis zur Klassenstufe 8 alle in Abbildung 3.3 dargestellten Formeln. Allein die Vielzahl an Formeln zeigt, dass diese im (sächsischen) Unterricht eine wichtige Rolle spielen. Deutschlandweit betrachtet, scheint diese Relevanz ähnlich zu sein. Dieser Eindruck deckt sich mit Lehrbuchanalysen von Strahl, Thiele und Müller (2013), die insgesamt 49 in Deutschland zugelassene Lehrbücher analysierten und eine durchschnittliche „Formeldichte“ von 1,68 Formeln pro Seite ermittelten.⁴

Gleichzeitig lassen aber empirische Ergebnisse (s. Kap. 3.3.5) und auch persönliche Erfahrungen von LehrerInnen vermuten, dass Formeln für viele SchülerInnen eine Art Schreckgespenst darstellen. Aus diesem Grund soll in diesem Kapitel neben einer Analyse des Formelbegriffes und der inhaltlichen Bedeutung von Formeln eine Zusammenstellung aus der Literatur bekannter theoretischer Ansätze und empirischer Ergebnisse zum Lernen mit und über Formeln erfolgen.

3.3.1. Zum Begriff Formel

Eine Formel ist Teil der physikalischen Fachsprache. Sie ist mathematisch gesehen ein algebraischer Ausdruck, der durch die Formelzeichen physikalische Bedeutung trägt und die Beziehung zwischen physikalischen Größen beschreibt oder neue Größen definiert (wie z. B. die Dichte $\rho = \frac{m}{V}$ mit m ...Masse, V ...Volumen).

³Wörtlich ist der Begriff Formel in dem Bildungsstandards nicht zu finden. Im Kompetenzbereich Erkenntnisgewinnung findet sich folgende Forderung „Modelle bilden: Idealisieren, Beschreiben von Zusammenhängen, Verallgemeinern, Abstrahieren, Begriffe bilden, Formalisieren, Aufstellen einfacher Theorien, Transferieren“ (Kultusministerkonferenz, 2005, S. 10) Als Teil der Idealisierung im Rahmen von Mathematisierungen, Verallgemeinerungen, Abstraktion und Formalisierung sind Formeln eine wirkungsvolle Darstellungsform und eine naheliegende Möglichkeit der Mathematisierung, wie sie als Standard E4: „wenden einfache Formen der Mathematisierung an“ (Kultusministerkonferenz, 2005, S. 11) gefordert wird. Auch für den Kompetenzbereich Kommunikation ist das Verständnis von Formeln von großer Relevanz, da sie Teil der physikalischen Fachsprache sind (Standard K1: „tauschen sich über physikalische Erkenntnisse und deren Anwendung unter angemessener Verwendung der Fachsprache und fachtypischer Darstellungen aus“ (Kultusministerkonferenz, 2005, S. 12)). Im Kompetenzbereich Fachwissen findet sich außerdem an mehreren Stellen der Begriff der „Gesetzmäßigkeiten“. Hier wird nicht explizit gefordert, dass diese Gesetzmäßigkeiten in algebraischer Form formuliert sein müssen. Eine Formel ist jedoch die im Fach Physik typische Darstellungsform für Gesetzmäßigkeiten.

⁴Die Formeldichten schwankten je nach unterschiedlicher Schulform und Lehrbuch (Hauptschule: 0,8; Gymnasium: 0,64 - 1,93) und auch je nach Themenbereich.

Klasse 6	Klasse 7	Klasse 8
$\rho = \frac{m}{V}$	$F_1 \cdot l_1 = F_2 \cdot l_2$	$p = \frac{F}{A}$
$v = \frac{s}{t}$	$I = I_1 = I_2$	$Q = m \cdot c \cdot \Delta T$
$s \sim t$	$I_{ges} = I_1 + I_2$	$R = \frac{U}{I}$
	$U_{ges} = U_1 + U_2$	$p = \rho \cdot g \cdot h$
	$U = U_1 = U_2$	$I \sim U \ (T = konst.)$
	$P = \frac{E}{t}$	$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2}$
		$R = \rho \cdot \frac{l}{A}$
		$E = U \cdot I \cdot t$
		$\frac{1}{R_{ges}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$
		$P = U \cdot I$
		$R_{ges} = R_1 + R_2$

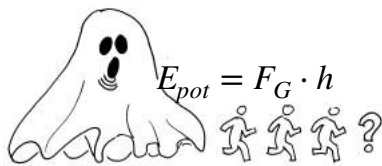


Abbildung 3.3.: Wirken diese laut sächsischem Lehrplan für das Gymnasium geforderten Formeln (vgl. SMK, 2011) auf SchülerInnen abschreckend?

Formeln nützen in der Physik, um konkrete Werte zu berechnen, zum Beispiel auch um quantitative Vorhersagen machen zu können. Neben diesem technischen Aspekt fassen Formeln aber auch auf sehr kleinem Raum viele physikalische Inhalte und Konzepte zusammen und erlauben die präzise Formulierung physikalischer Gesetze (vgl. auch Pospiech, 2019). Als wirkungsvoller Teil der Mathematisierung erfüllen sie die in Kapitel 2.1.2 beschriebenen Funktionen der kognitiven Entlastung, Kommunikation, Exaktheit, Objektivität und Idealisierung und folgen dabei häufig auch einem ästhetischen Anspruch.

Im deutschsprachigen Raum werden die Begriffe Formel und Gleichung in der Physikdidaktik häufig synonym verwendet. Jedoch lohnt es sich, über die beiden Begriffe und mögliche Bedeutungsunterschiede nachzudenken, um einige Schwierigkeiten zu verstehen, die SchülerInnen mit unterschiedlichen Konzepten von Formel und Gleichung in Physik und Mathematik haben können. Heck und Buuren (2019) beschreiben den Unterschied zwischen „formula“ und „equation“ folgendermaßen:

„For example, the word formula has a special meaning in school mathematics, and the role of the letters in the formula $y = x^2$ is not the same as in the equation $y - x^2 = 0$. The words formula and equation are used to distinguish between the case of a functional relationship between the isolated variable that depends on the other variable and the case of a more general relationship between unknowns.“ (Heck und Buuren, 2019, S. 61)

Während eine Formel somit immer eine bestimmte Reihenfolge hat, in der die Größen und auch ihre Abhängigkeiten notiert werden und die Größe auf der linken Seite des Gleichheitszeichens somit immer eine von den Größen auf der rechten Seite des Gleichheitszeichens abhängige Größe darstellt, ist eine Gleichung eine allgemeine Beziehung zwischen Größen auf der linken und der rechten Seite eines Gleichheitszeichens. Um dies noch einmal zu verdeutlichen: Mathematisch gesehen sind die Gleichungen $F = m \cdot a$ und $a = \frac{F}{m}$ äquivalent. Beladen wir die Formelzeichen jedoch mit ihren physikalischen Bedeutungen (F ...Kraft, m ...Masse, a ...Beschleunigung), dann beschreiben die zwei Ausdrücke unterschiedliche physikalische Situationen: $F = m \cdot a$ beschreibt die Größe einer Kraft, die auf einen mit a beschleunigten Körper der Masse m wirkt. Diese Formel wird beispielsweise genutzt, um Kräfte zu berechnen, die bei Bremsvorgängen wirken. $a = \frac{F}{m}$ beschreibt die Größe einer Beschleunigung a , wenn auf einen Körper der Masse m eine bestimmte Kraft F wirkt. In diesem Fall liegt also das „Erkenntnisinteresse“ wiederum auf der linken Seite des Gleichheitszeichens: der Beschleunigung. Diese kann zum Beispiel für ein Fahrzeug, auf das ein Motor eine bestimmte Kraft ausübt, ermittelt werden.

In dieser Arbeit wird ausschließlich der Begriff Formel genutzt. Es wird davon ausgegangen, dass sich umgestellte Formeln, die nach der Beschreibung oben wiederum eigenständige Formeln wären, immer auf eine bestimmte Grundformel beziehen. Darum werden diese umgestellten Formeln für die Auswertung von Aussagen zu jeweils einer Grundformel zusammengefasst. Im Rahmen dieser Arbeit wird auch der algebraische Term $I \sim U$, der als Ohmsches Gesetz die Proportionalität zwischen Stromstärke und Spannung beschreibt, unter die untersuchten Formeln gefasst. Da dieser Ausdruck keine Entsprechung verschiedener Größen, sondern lediglich eine Proportionalität beschreibt, handelt es bei diesem Ausdruck um keine Formel im eigentlichen Sinne. Für eine bessere Lesbarkeit wird jedoch im Folgenden der Ausdruck Formel auch für das Ohmsche Gesetz genutzt.

3.3.2. Formelinhalt: Was sagt eine Formel inhaltlich aus?

Bei der Beschäftigung mit Formeln im Physikunterricht unter besonderer Berücksichtigung der strukturellen Rolle der Mathematik, also einer Stärkung der inhaltlichen Seite mathematischer Ausdrücke und einer intensiven Verknüpfung mathematischer Darstellungsformen und physikalischer Aussagen und Bedeutungen, stellt sich die Frage: Was bedeutet eine Formel? Welche Inhalte fasst sie zusammen? Und was sollen SchülerInnen über Formeln wissen und aus ihnen lesen können? Dieser Abschnitt soll sich zunächst aus theoretischer fachdidaktischer Perspektive mit der Frage befassen,

was eine Formel inhaltlich bedeutet. Die unterrichtspraktischen Überlegungen dazu, wie man diese Formelbedeutung vermitteln kann, schließen sich im Abschnitt „Interpretieren einer Formel“ in Kapitel 3.3.4 an. Eine Zusammenfassung dessen, was in dieser Arbeit unter der Bedeutung einer Formel zu verstehen ist, findet sich in der Zusammenfassung der Theorie in Kapitel 6.

Formelzeichen

Formeln sind algebraische Ausdrücke, bei denen sprachwissenschaftlich gesehen die physikalischen Formelzeichen als Symbole durch innerhalb einer wissenschaftlichen Disziplin fest definierte Konventionen für bestimmte Termini stehen. Diese Termini haben wiederum festgelegte Definitionen, die für ein Verstehen der Formel bekannt sein müssen. Die mathematischen Symbole stehen für ebenfalls streng definierte mathematische Operationen. Somit stellt eine Formel auf wenig Raum viel Inhalt dar. Dies kann dadurch beschrieben werden, dass eine Formel eine stark verdichtete Semantik aufweist (s. Abb. 3.4). Greca und Moreira (2001, S. 111) sprechen in diesem Zusammenhang auch von der Semantik physikalischer Modelle und der syntaktischen Struktur mathematischer Modelle, die sich für das Verständnis eines physikalischen Phänomens zusammensetzen.

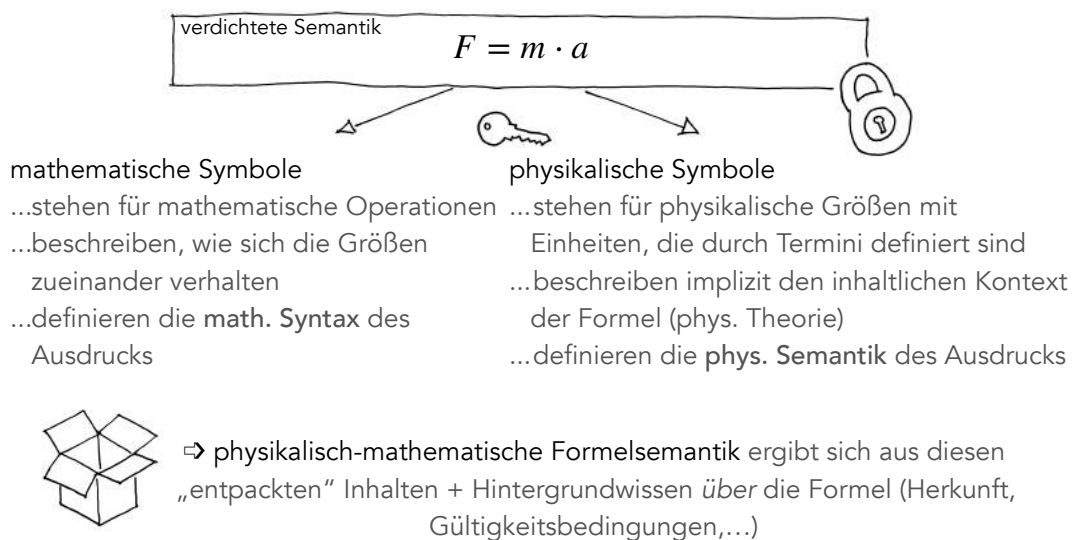


Abbildung 3.4.: Verdichtete Semantik einer Formel

Praktische Überlegungen zur inhaltlichen Bedeutung einer Formel macht zum Beispiel Romer (1993), der StudentInnen das „Lesen“ einer Formel, also das Entschlüsseln des Formelinhaltes, näherbringen möchte. Für ihn sollten zum einen die Bedeutung

der physikalischen und mathematischen Symbole erkannt werden. Doch: „In stating what the symbols mean, we have only just *begun* to provide the hidden text that goes with this equation.“ (Romer, 1993, S. 129). Redish und Kuo (2015, S. 576) drücken sich ähnlich aus: „Understanding an equation in physics is not limited to connecting the symbols to physical variables and being able to perform the operations with that equation. An important component is being able to connect the mathematical operations in the equation to their physical meaning and integrating the equation with its implications in the physical world.“

Essenziell ist hier die Umschreibung des „hidden text“, denn während die Formelzeichen und mathematischen Operatoren offensichtliche Oberflächenmerkmale der Formel sind, sind alle weitergehenden Punkte, die Romer (1993) nennt, nicht ohne zusätzliches Wissen zu entschlüsseln: der „logical status“ der Formel (epistemologische Klassifizierung und Herkunft), der Formel zugrundeliegende Idealisierungen und Näherungen, Anwendungsbereich und erwartbare Genauigkeit mit der Formel ermittelter Ergebnisse, Einheitenbetrachtungen, Betrachtung von Grenzfällen, Untersuchung des mathematischen Verhaltens einzelner Größen zueinander, mathematisches Umstellen der Formel und Untersuchung der neuen Version, Bedeutung einzelner Faktoren (z. B. warum eine Größe quadratisch eingeht) und die Überprüfung an der Realität durch Experimente. Die Formel muss somit mit weiteren Wissensressourcen des „Lesers“ verknüpft sein, um dieses tiefergründige Lesen zu ermöglichen. Diese Verknüpfung unterschiedlichster Wissensressourcen kann durch die Theorie der semantischen Netzwerke beschrieben werden, die im folgenden Abschnitt dargestellt wird.

Das semantische Netzwerk einer Formel

Die vielfältigen Wissensressourcen aufzuschlüsseln und darzustellen, ist kein einfaches Unterfangen. Eine rein objektive Lösung und Lehrmeinung, welches Wissen zu welcher Formel „gehört“ und mit welchen Informationen der verpackte Inhalt einer Formel vollständig dargestellt ist, gibt es nicht. Redish und Kuo (2015) nutzen für die Rekonstruktion der Bedeutung einer Formel sprachwissenschaftliche Methoden und schlagen vor, die aus der kognitiven Semantik stammenden Konzepte von „*embodied cognition*“, „*encyclopedic knowledge*“ und „*contextualization*“ zu nutzen, um Formelbedeutungen zu entschlüsseln.

Unter „*embodied cognition*“ ist eine grundlegende Fundierung unserer Vorstellungen in haptischen Erfahrungen zu verstehen, ähnlich den enaktiven Repräsentationen bei Bruner (1974) (s. Kap. 5.1). Auf die Physikdidaktik übertragen sehen die Autoren die

„symbolic forms“ von Sherin (2001) (s. Tab. 3.1) als eine Möglichkeit, solche enaktiven Repräsentationen für Formeln darzustellen (vgl. Redish und Kuo, 2015, S. 569-570).

„Contextualization“ beschreibt den Umstand, dass alles Wissen, das wir rekonstruieren, immer in einen Kontext eingebettet ist und auch in seiner spezifischen Bedeutung vom Kontext abhängt. Dieser Kontext ist sowohl lokal (situationale Einbettung) als auch global (persönliche Einbettung, z. B. Vorwissen, Vorerfahrungen, emotionale Faktoren). In Bezug auf Formeln kann die unterschiedliche Bedeutungszuweisung zu mathematischen Strukturen, je nachdem, in welchem physikalischen Kontext (mit welchen Formelzeichen) sie genutzt werden, dies verdeutlichen: Während die Addition in $v = v_0 + a$ in der Regel als „symbolic form“ Basis plus Änderung verstanden wird, wird die Addition in $E = \frac{1}{2}mv^2 + mgh$ eher als „Teile eines Ganzen“ verstanden (vgl. Redish und Kuo, 2015, S. 573).

Die dritte Variante der Bedeutungsrekonstruktion ist das „encyclopedic knowledge“. Diese Theorie geht davon aus, dass die Bedeutung einzelner Wörter nie im Sinne einzelner Definitionen zu verstehen sind, sondern „in reference to a contextual web of concepts“ (Redish und Kuo, 2015, S. 571). Im deutschsprachigen Raum sind vergleichbare Beschreibungen als semantische Netzwerke bekannt, darum soll in dieser Arbeit dieser Begriff genutzt werden. Semantische Netzwerke beschreiben, dass Wissen immer mit sehr vielen anderen Wissensressourcen verknüpft ist. Erst die Summe all dieser unterschiedlichen Konzepte bildet dann auch das Verständnis einer Formel. Redish und Kuo (2015) nennen als Beispiele, neben der Bedeutung der Formelzeichen und der Bedeutung der mathematischen Operatoren, das Netzwerk an Ideen zu den physikalischen Größen und Konzepten. Dieses semantische Netzwerk ist bei jeder Person unterschiedlich gestaltet. Die Abbildung 3.5 zeigt einen Ausschnitt eines möglichen Netzwerkes zur Formel $s = \frac{1}{2}a \cdot t^2$. Das Netzwerk ist in alle Richtungen erweiterbar.

Für die Bedeutungskonstruktion von Formeln halten Redish und Kuo (2015, S. 573) fest: „Making of meaning with equations shares (at least) three key commonalities with meaning-making in language: an embodied basis, the use of encyclopedic knowledge, and contextual selection of that encyclopedic knowledge for meaning-making.“

Der Ansatz, Formelbedeutungen mit Hilfe semantischer Netzwerke zu beschreiben, kann nach Redish und Kuo (2015) auch aus Sicht der Theorie der „resources framework“ (vgl. z. B. DiSessa, 1993; Hammer, 2000) als sinnvoll angesehen werden. Diese Theorie beschreibt, dass individuelle Bedeutungskonstruktionen immer Resultat einer Aktivierung zahlreicher kognitiver Ressourcen und damit stark von individuellen Vorkenntnissen abhängig sind. Bedeutungszuweisung ist immer eingebettet in externe und interne Kontexte und damit den individuellen semantischen Netzwerken der Lernenden (vgl. Redish und Kuo, 2015, S. 573-574).

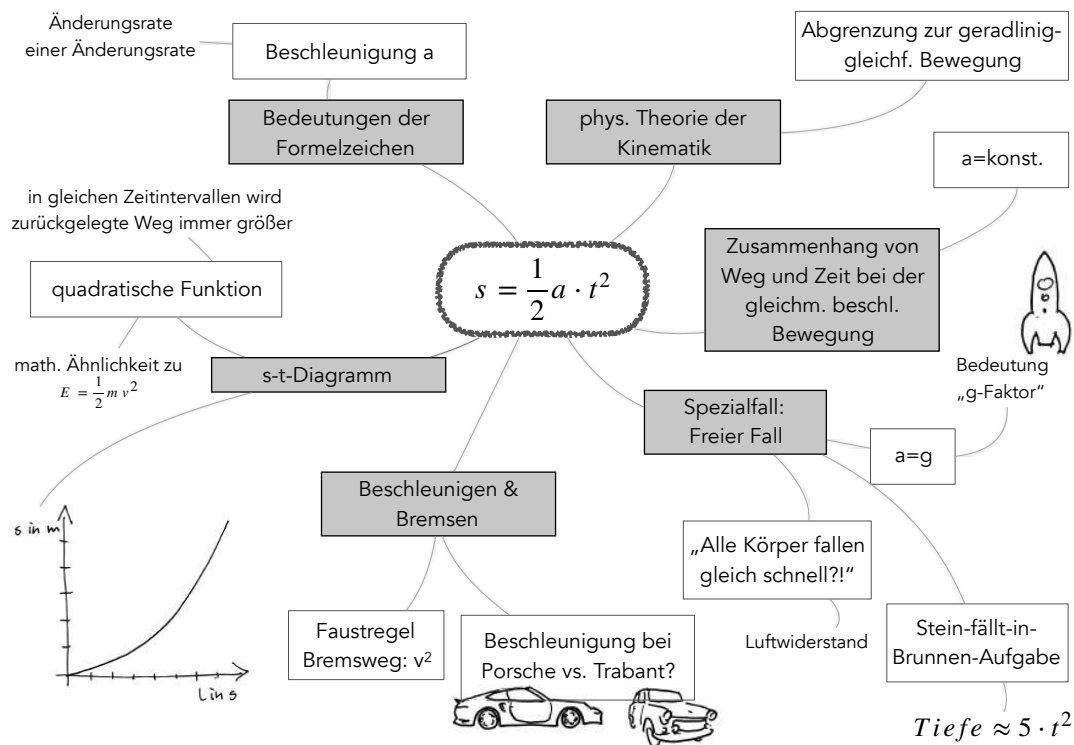


Abbildung 3.5.: Ausschnitt eines semantischen Netzwerkes für die Formel $s = \frac{1}{2} a \cdot t^2$

Mathematische Bedeutung physikalischer Formeln

Die Semantik mathematischer Zeichen und auch die Konventionen, mit denen sie genutzt werden, unterscheiden sich zwischen den zwei Disziplinen Mathematik und Physik zum Teil erheblich. Mathematik in der Mathematik ist somit nicht das gleiche wie Mathematik in der Physik. Hierin sind sich zahlreiche AutorInnen einig (vgl. z. B. Redish und Kuo, 2015; Sherin, 2001; Karam, Uhden und Höttecke, 2019; Heck und Buuren, 2019).

So ist es beispielsweise in der Physik üblich, zwei Größen mit unterschiedlichen Einheiten miteinander zu multiplizieren, als Ergebnis kommt eine dritte, andere Größe heraus. In der Mathematik werden Multiplikationen eher als Additionsreihen ($3 \cdot 2 = 2 + 2 + 2$) oder als Flächeninhalte interpretiert. Auch bei Divisionen ist es in der Physik üblich, Größen unterschiedlicher Einheiten zu dividieren. In der Mathematik werden Divisionen vor allem als Teile eines Ganzen verstanden. In der Physik wird ein Bruch häufig als ein „pro“ verstanden: $\frac{s}{t}$ wird als Strecke *pro* Zeiteinheit interpretiert. Allgemein nehmen Einheiten in der Physik eine sehr entscheidende Rolle ein und werden in der Regel bei allen mathematischen Operationen und Ausdrücken

mitgedacht. (Vgl. Karam, Uhden und Höttecke, 2019)

Auch das Gleichheitszeichen hat in der Physik eine eigene Semantik. Im Anfangsunterricht der Mathematik (in dem insbesondere Arithmetik vermittelt wird), ist das Gleichheitszeichen meist als eine Handlungsaufforderung für eine Rechenoperation zu verstehen ($2 + 6 = \square$, vgl. auch Kieran, 1981). Später wird das Gleichheitszeichen in einem algebraischen Sinne als Äquivalenz zweier Ausdrücke verstanden, ähnlich einer Waage, bei der auf beiden Seiten die gleiche Masse liegt (vgl. Heck und Buuren, 2019, S. 58). In der Physik kommen insbesondere spezifischere Bedeutungszuweisungen zum Tragen. Ein Gleichheitszeichen kann „ist gleich“, „soll gleich sein“, „stimmt überein mit / entspricht“, „wird der Wert zugeordnet“, „ist definiert als“, „ist äquivalent mit“ bedeuten (vgl. Heck und Buuren, 2019, S. 62). Häufig wird das Gleichheitszeichen vor allem als ein Wirkzusammenhang gesehen. Die zwei Seiten einer Formel sind also nicht nur äquivalent, sondern es gibt abhängige und unabhängige Variablen, die aber nicht wie in der Mathematik bei der Formulierung funktionaler Zusammenhänge explizit bezeichnet werden. Beispielsweise könnte man mathematisch formulieren: $I(U) = \frac{1}{R} \cdot U$. Dies würde die Abhängigkeiten der Größen explizit benennen: Eine angelegte Spannung bewirkt an einem Stromkreis mit einem festen Widerstand als „Vorfaktor“ eine bestimmte Stromstärke. Die Formel $U = R \cdot I$ drückt in diesem Verständnis etwas anderes aus. Die rechte Seite der Formel ($R \cdot I$) „ergibt“ oder „verursacht“ in diesem Fall nicht die linke Seite (U) (vgl. auch Wilhelm, 2013).

Aus der Mathematikdidaktik beschreibt der theoretische Ansatz der Grundvorstellungen die individuelle Sinnzuweisung zu mathematischen Inhalten. Unterschieden wird zwischen normativen Grundvorstellungen (Was *sollen* SchülerInnen sich vorstellen?) und deskriptiven Grundvorstellungen (Was stellen sich SchülerInnen tatsächlich vor?). Aus Diskrepanzen zwischen beiden können dann sinnvolle Hinweise für die didaktische Gestaltung des Unterrichts abgeleitet werden. Beispiele von Grundvorstellungen bei Additionen sind Handlungsvorstellungen wie das Hinzufügen, Zusammenfassen und Vereinen. Grundvorstellungen in Bezug auf die Multiplikation sind das Vervielfachen (räumlich oder zeitlich sukzessiv), Kombinieren oder kontinuierliches Vergrößern (vgl. Hofe, 1992; Hofe und Blum, 2016; Hofe, 2019).

Für die Bedeutung mathematischer Operatoren in der Physik untersucht Sherin (2001) die deskriptiven Grundvorstellungen bei Studierenden und formulierte als Ergebnis verschiedene „symbolic forms“ mit eigener physikalisch-mathematischen Semantik. Die Tabelle 3.1 stellt die von Sherin (2001, S. 506) identifizierten „symbolic forms“ dar.⁵

⁵Die Übersetzung der Begriffe ist an der Übersetzung von Uhden (2012, S. 35) orientiert. Einzelne Begriffe wurden anders übersetzt.

cluster	symbolic form	symbolic pattern
konkurrierende Terme	Einfluss	$\square \pm \square \pm \square$
	Gegensatz / Widerpart	$\square - \square$
	Gleichgewicht	$\square = \square$
	Auslöschten (a)	$0 = \square - \square$
Proportionalität	direkte Proportionalität	$\left[\frac{\dots x \dots}{\dots} \right]$
	indirekte Proportionalität	$\left[\frac{\dots}{\dots x \dots} \right]$
	Verhältnis	$\left[\frac{x}{y} \right]$
	Auslöschten (b)	$\left[\frac{\dots x \dots}{\dots y \dots} \right]$
Mengen	Teile eines Ganzen	$[\square + \square + \square]$
	Basis und Änderung	$[\square \pm \Delta]$
	Ganzes minus Teil eines Ganzen	$\square \pm \square$
	gleiche Menge	$\square = \square$
Abhängigkeit	abhängig von einer Größe	$[...x...]$
	unabhängig von einer Größe	$[...]$
	abhängig <i>nur</i> von einer Größe	$[...]$
Koeffizienten	Koeffizient	$[x\square]$
	Skalierung	$[n\square]$
Multiplikation	intensive Größe mal extensive Größe ⁶	$x \cdot y$
	extensive Größe mal extensive Größe	$x \cdot y$
Weiteres	Identität	$x = ...$
	Ausklängen	$[e^{-x...}]$

Tabelle 3.1.: Die von Sherin (2001) identifizierten symbolic forms zur Bedeutungszuweisung mathematischer Ausdrücke in physikalischen Formeln

Epistemologische Klassifizierung von Formeln

In der Physik und im Physikunterricht begegnen uns sehr viele Formeln. Diese sind in der Art ihrer Aussage aber keinesfalls gleich. Romer (1993) betont:

⁶Intensive Größen sind Zustandsgrößen, die unabhängig von der Größe des Systems oder der Teilchenzahl sind, z. B. Temperatur, Druck. Extensive Größen sind Zustandsgrößen, die abhängig von der Größe des Systems sind, z. B. Volumen, innere Energie, elektrische Ladung. Das Produkt einer intensiven und einer extensiven Größe ist eine extensive Größe. Der Quotient aus zwei extensiven Größen ist eine intensive Größe.

„First we should ask about the *logical status* of the equation. We deal with many equations in physics, all of which have in common the fact that they contain an ‘equals’ sign, but various equations play very different roles. Some equations are even wrong. Some are ‘true’ but only tautologically so, because they are just definitions.“ (Romer, 1993, S. 129)

Neben den „definitions“ nennt er als weitere Kategorien „expressions of fundamental laws of nature“ und „specialized and narrowly applicable results“. Außerdem müsse man unterscheiden, ob eine Formel eine „mathematical expression of an empirically discovered regularity“ ist oder aber „logically derived from a more fundamental physical law“ (Romer, 1993, S. 129).

Das folgende Beispiel verdeutlicht, dass diese Überlegungen auch für den Physikunterricht von Relevanz sind. So können sich SchülerInnen fragen, warum es jeweils zwei Formeln für den elektrischen Widerstand und die Kapazität eines Plattenkondensators gibt:

$$(1) R = \frac{U}{I} \text{ und } (2) R = \rho \cdot \frac{l}{A}$$

$$(3) C = \frac{Q}{U} \text{ und } (4) C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{d}$$

(wobei gilt: R...elektrischer Widerstand, U...elektrische Spannung, I...elektrische Stromstärke, ρ ...Materialkonstante: spezifischer elektrischer Widerstand, l...Länge eines langen metallischen Leiters, A...Querschnittsfläche eines langen metallischen Leiters, C...Kapazität eines Plattenkondensators, Q...im Plattenkondensator gespeicherte Ladung, ϵ_0 ...elektrische Feldkonstante, ϵ_r ...Dielektrizitätskonstante des zwischen den Platten befindlichen Mediums, A...Fläche einer Kondensatorplatte, d...Abstand der Platten)

Auffällig sind zunächst die ähnlichen mathematischen Strukturen der Formeln (1) und (3). Außerdem finden wir in den Formeln (2) und (4) jeweils Materialkonstanten und geometrische Größen. Grundsätzlich sind auch die erkenntnistheoretischen Hintergründe der Formeln jeweils ähnlich: Während (1) und (3) Definitionen physikalischer Größen sind, sind (2) und (4) empirische Regularitäten, die nur für bestimmte Anwendungsbereiche gültig sind (einen langen metallischen Leiter bzw. einen Plattenkondensator). Die Formel (4) kann statt aus experimentellen Daten auch aus allgemeingültigeren Prinzipien (über das elektrische Feld und den Satz von Gauß) hergeleitet werden. Um ein strukturelles Verständnis für diese unterschiedlichen Formeln zu fördern und nicht bei einer rein pragmatischen, technischen Erklärung (nach dem Sinn: „Je nachdem, welche Größen für eine Rechnung gegeben sind, nehmen wir die eine

oder die andere Formel“) zu bleiben, ist es somit auch in der Schule sinnvoll, über erkenntnistheoretische Unterschiede zwischen Formeln zu sprechen.

Karam und Krey (2015) benennen vier unterschiedliche epistemologische Kategorien von Formeln:

- Prinzipien: durch Beobachtungen und Experimente anzunehmende grundlegende „Wahrheiten“ (z. B. $\sum \vec{p} = 0$)
- Definitionen: beschreiben notwendige physikalische Größen (z. B. $\vec{p} = m\vec{v}$)
- Empirische Regularitäten: in Experimenten ermittelte Zusammenhänge zwischen Größen (z. B. die Balmer-Formel)
- Ableitungen: formale Deduktionen aus grundlegenden Prinzipien und/oder Definitionen (z. B. $a = \frac{v^2}{r}$ oder $E = mc^2$) (vgl. Karam und Krey, 2015, S.664)

Diese epistemologischen Unterschiede zwischen Formeln stellen zum einen eine Metainformation über eine Formel dar, die hilft, die Aussage einer Formel zu interpretieren. Zum anderen bieten Überlegungen zu diesen unterschiedlichen Klassifizierungen aber auch Anlass, über die Rolle von Formeln innerhalb der Wissenschaft Physik stärker zu reflektieren und auf diese Weise etwas über die Darstellungsform Formel generell zu lernen. Dies ist auch im Sinne einer „metarepresentational competence“ relevant (s. Kap. 3.1).

Um eine Formel zu verstehen, sind somit sehr unterschiedliche Informationen und Wissensressourcen notwendig, zu denen neben der Bedeutung der Symbole zum Beispiel auch die Einbettung der Formel in eine physikalische Theorie, Herleitungen, Anwendungsbereiche und Gültigkeitsbedingungen zählen. In Kapitel 6 wird eine Zusammenfassung gegeben, was in dieser Arbeit als Bedeutung einer Formel verstanden wird.

3.3.3. Lehrendenperspektive: Was denken LehrerInnen über Formeln?

Die individuellen Einstellungen und Kenntnisse von LehrerInnen beeinflussen ihren Unterricht. Dies trifft auch auf die Mathematik im Physikunterricht zu. Um diese Einstellungen und Kenntnisse in Bezug auf das Zusammenspiel von Mathematik und Physik besser beschreiben zu können, stellen Pospiech, Eylon *et al.* (2019) ein auf das Unterrichten von Mathematik in der Physik adaptiertes PCK-Modell (Pedagogical Content Knowledge) vor. Grundlage des Modells stellt das PCK-Modell von Magnusson, Krajcik und Borko (1999) dar. Das adaptierte Modell validieren die AutorInnen

durch Interviews mit 8 israelischen und 15 deutschen LehrerInnen. Grundsätzlich stellt das PCK-Model die Einflüsse auf die „orientation towards teaching“ von LehrerInnen in den Bereichen „knowledge of succesfull teaching strategies“, „knowledge regarding content“ und „knowledge regarding students“ dar. Diesen 4 Teilbereichen werden jeweils auf das „Math-Phys-Interplay“ bezogene inhaltliche Kernaspekte zugeordnet: Knowledge of succesful teaching strategies (technischer oder struktureller Fokus, generelle Strategien und Pattern, spezifische Vermittlungsstrategien, Erklärungen), knowledge regarding content (lehrplanrelevante Fachkenntnis, persönlicher Fokus, persönliche Wahl), knowledge regarding students (Fähigkeiten, Schwierigkeiten, Einstellungen, Interesse) (vgl. Pospiech, Eylon *et al.*, 2019, S. 274).

Die Ergebnisse der Interviews geben einen Einblick in die Sicht von LehrerInnen auf die Rolle von Mathematik im Physikunterricht.⁷ Nur etwa die Hälfte der interviewten LehrerInnen zeigt ein elaboriertes Bild über die Rolle der Mathematik in der Physik und erwähnen Aspekte, die der strukturellen Rolle der Mathematik zugeordnet werden. Diese strukturelle Rolle zeigt sich beispielsweise durch Äußerungen, die der Mathematik eine die Physik unterstützende Rolle zurechnen, die zu neuen Erkenntnissen führen kann. 3 LehrerInnen beschreiben die Rolle der Mathematik ausschließlich in einem technischen Sinne als eine Hilfswissenschaft. Allen befragten LehrerInnen ist jedoch bewusst, dass mathematische Ausdrücke immer physikalisch interpretiert werden müssen. Genannte Beispiele beziehen sich jedoch bei den meisten LehrerInnen nur auf die Interpretation von Graphen, nur etwa die Hälfte der befragten LehrerInnen nennen dieses Vorgehen explizit auch für Formeln (vgl. Pospiech, Eylon *et al.*, 2019, S. 278-279).

Die Befragung zu Vermittlungsstrategien führt zu vier Gruppen von LehrerInnen, die verschiedene Prinzipien vertreten: „concept-related“ (Inhalte werden vor mathematischen Konzepten vermittelt), „math-related“ (starker Fokus auf Vermittlung der Mathematik), „application-related“ (Betonung der praktischen Anwendung physikalischer Konzepte) und „multifaceted“ (verschiedene Aspekte der drei zuvor genannten Prinzipien treten gleich stark auf) (vgl. Pospiech, Eylon *et al.*, 2019, S. 280-281).

Diese Gruppen spiegeln sich auch in anderen Studien wider, die Gruppen bezüglich der Einstellung von LehrerInnen zur Mathematik in der Physik identifizieren. Diese Gruppen weisen deutliche Parallelen auf, sind jedoch nicht deckungsgleich (s. Abb. 3.6). Eine qualitative Studie von Pereira de Ataíde und Greca (2013), bei der Lehramts-

⁷Allerdings ist an dieser Stelle zu betonen, dass es sich bei den befragten LehrerInnen um „expert teachers“ handelt. Die Stichprobe wurde also bewusst so gewählt, dass die LehrerInnen viel Unterrichtserfahrung aufweisen und sich neben ihrer normalen Lehrtätigkeit weiter qualifiziert und profiliert haben. Es kann also davon ausgegangen werden, dass die beteiligten LehrerInnen überdurchschnittlich reflektiert sind und über ein breites Wissen verfügen.

studentInnen interviewt wurden und anschließend Problemlöseaufgaben bearbeiteten, zeigen drei mögliche Einstellungen zur Rolle der Mathematik in der Physik, die sich mit der in Kapitel 2.1.3 dargestellten Theorie decken: Mathematik wird als *Werkzeug* gesehen, das von PhysikerInnen für numerische Kalkulationen genutzt wird. Mathematik wird als *Sprache* gesehen, die physikalische Gedanken übersetzt und sie in einer verständlichen Weise darstellt. Mathematik wird als *Struktur* gesehen, die physikalische Gedanken strukturiert (vgl. Pereira de Ataíde und Greca, 2013, S. 1412). Diese Einstellungen zeigen sich in Verhaltensmustern, „theorems in action“ genannt. Diese Verhaltensmuster sind „operational mathematics“ (Studierende, die Mathematik als eine Technik nutzen, um Probleme im Try-and-Error-Verfahren zu lösen), „Conceptualization“ (Fokus wird auf konzeptuelles Verständnis gelegt, Studierende versuchen, Konzepte und Mathematik in Problemlöseprozessen zu verknüpfen) und „Mathematical Reasoning“ (Studierende nutzen mathematische Argumente, die zur physikalischen Problemstellung passen, arbeiten aber mathematisch nicht immer korrekt) (vgl. Greca und Ataíde, 2019, S. 162).

In einer Fragebogenerhebung von Thoms (2011) wird die untersuchte Stichprobe in „Formelanwender“ und „Formelerarbeiter“ eingeteilt. Formelanwender legen den Fokus auf das Arbeiten mit Formeln, beispielsweise das Interpretieren oder Rechnen. Diese Anwendung von Formeln nimmt auch in Klausuren einen wesentlichen Teil ein. Formeln werden von ihnen eher deduktiv vorgegeben und als Grundlage einer Unterrichtseinheit gesehen. Den Formelerarbeitern hingegen ist die induktive Herleitung von Formeln, beispielsweise aus experimentellen Daten, wichtig. In Klausuren wird größerer Wert auf Erklären gelegt (vgl. Thoms, 2011, S. 30-31).

Bei der Beschreibung konkreter Unterrichtshandlungen identifizieren Pospiech, Eylon *et al.* (2019) außerdem verschiedene „teaching pattern“, die LehrerInnen für die Vermittlung mathematischer Aspekte im Physikunterricht nutzen. Die gefundenen Pattern sind

- Exploration: Mathematische Zusammenhänge werden analysiert, um das Verhalten eines physikalischen Systems zu erkunden. Beispielsweise werden Grenzbereiche, Gültigkeitsbereiche, Annäherungen, Extremfälle untersucht.
- Construction: Mathematische Modelle werden konstruiert und entwickelt, um ein physikalisches System zu beschreiben. Beispielsweise werden Formeln aus Experimenten oder grundlegenden Prinzipien hergeleitet.
- Broadening: In übergeordelter Sichtweise werden grundlegende Gesetze und Prinzipien der Physik gezeigt und analysiert. Beispielsweise werden Symme-

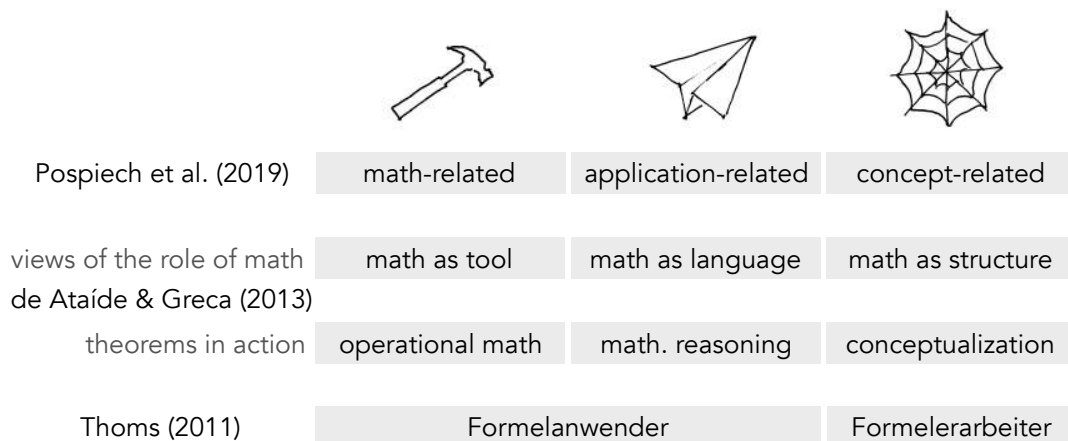


Abbildung 3.6.: Gruppen bezüglich der Einstellung zur Rolle der Mathematik in der Physik und zu Vermittlungs- sowie Problemlösestrategien

trien, Ähnlichkeiten zwischen Ausdrücken und Analogien genutzt, um übergeordnete Sichtweisen zu erkunden.

- Application: Bereits bekannte Gesetze oder mathematische Darstellungsformen im Allgemeinen werden bei Problemlöseaufgaben angewendet. (Vgl. Lehavi *et al.*, 2019, S. 336)

Die Bedeutung von Formeln für die Physik und den Physikunterricht scheinen LehrerInnen also durchaus als vielfältig wahrzunehmen. Dies zeigt auch eine Fragebogenerhebung mit 244 LehrerInnen in Niedersachsen. Nach ihrer Einstellung zu Formeln im Unterricht befragt, zeigt sich, dass die teilnehmenden LehrerInnen Formeln als mathematische Beschreibungen physikalischer Zusammenhänge sehen, die beispielsweise physikalische Größen definieren oder Naturgesetze beschreiben. Außerdem werden Formeln als kurze, elegante Hilfsmittel gesehen, um quantitative Aufgaben zu lösen (vgl. Strahl, Thiele und Müller, 2013, S. 3). Auf die offene Frage, warum und wofür Formeln für die Physik oder den Physikunterricht wichtig seien, werden sehr unterschiedliche Antworten genannt, unter denen Kalkulationen nur einen kleinen Teil des Antwortspektrums darstellen. So werden Formeln als Möglichkeit gesehen, Erkenntnisse zu verstehen und neue Erkenntnisse zu erzeugen. Die Funktionen von Formeln umfassen dabei die Beschreibung von Inhalten, die Modellbildung und Mathematisierung und auch die Vorhersage physikalischer Ereignisse. Die Formel selbst wird als je-desto-Beziehung zwischen den enthaltenen Größen verstanden, als Funktion oder

als Rechenanweisung. Genannte Eigenschaften von Formeln sind ihre Quantität, Kürze, Exaktheit, Prägnanz und Einfachheit. Für den schulischen Kontext werden sie als Möglichkeit wahrgenommen, physikalische Methoden einzuüben. Außerdem wird explizit der Einsatz von Formeln für Leistungsüberprüfungen genannt (vgl. Strahl, Thoms und Müller, 2012, S. 321).

Die Einstellungen von LehrerInnen zu Formeln und ihr Umgang mit Formeln im Physikunterricht können somit sehr unterschiedlich sein. Dies zeigt sich auch in verschiedenen Vermittlungsstrategien. Bei vielen Untersuchungen ist ein Schwerpunkt auf technischen Aspekten zu erkennen. So fassen Greca und Ataíde (2019) zusammen:

„From this sample, only 32% of the students appear to have theorems-in-action that manage to address an appropriate relationship between mathematics and physics. Most of the veteran students appear to have theorems-in-action that guide an instrumental use of mathematics.“ (Greca und Ataíde, 2019, S. 165)

Die Einstellungen der „expert teachers“ in der Untersuchung von Pospiech, Eylon *et al.* (2019) fallen etwas differenzierter aus, aber auch hier findet sich ein Schwerpunkt im Bereich der technischen Rolle der Mathematik. So fassen Pospiech, Eylon *et al.* (2019) zusammen:

„In the views of the teachers, mathematics as a tool or an instrument in physics is prevalent. But the teachers also share the view that mathematics could contribute to the understanding of physics. [...] In lower secondary school and even in high school, the teachers mainly struggle with the students' mathematical-technical abilities. They often see it as their first task to ensure the necessary technical competences and procedural knowledge as a presupposition of more conceptual aspects. But even in this stage, some teachers emphasize that the mathematical techniques have always to be connected to the physics.“ (Pospiech, Eylon *et al.*, 2019, S. 289)

3.3.4. Aktivitäten mit Formeln: Was sollen SchülerInnen im Unterricht mit Formeln tun?

Unter Berücksichtigung der in Kapitel 3.1 vorgestellten theoretischen Grundlagen zum Lernen mit und über Darstellungsformen, sollten SchülerInnen in der Lage sein, Formeln zu „lesen“, also zu verstehen, welche Informationen sie enthalten. Im Unterricht wird dies beispielsweise mit Interpretationsaufgaben geübt. Außerdem sollten sie, um

ein vollständiges Verständnis der Darstellungsform Formel zu erlangen, Formeln in andere Darstellungsfomen übertragen können. Dies kann mit Aufgaben, die einen Darstellungswechsel explizit fordern, geübt werden. In Hinblick auf eine Beachtung der in Kapitel 3.2 dargestellten technischen und strukturellen Rolle der Mathematik sollten auch die Aktivitäten, die SchülerInnen mit Formeln im Physikunterricht durchführen, technische und strukturelle Fähigkeiten verlangen und fördern. Dies ist zum einen Voraussetzung, um überhaupt strukturelle Fähigkeiten zu entwickeln, zum anderen ist nur so möglich, adäquate Vorstellungen der Rolle der Mathematik in der Physik im Rahmen einer wissenschaftstheoretischen Ausbildung („nature of science“) zu entwickeln.

Geyer (2020) klassifiziert aus der Theorie bekannte Tätigkeiten beim Umgang mit algebraischen Ausdrücken und ergänzt diese durch induktiv gefundene Tätigkeiten. Sie beschreibt die Bereiche Informationsentnahme, Konstruktion, Arbeiten mit der Darstellung und Einbettung. Diese Bereiche enthalten die folgenden konkreten Tätigkeiten:

Informationsentnahme: lokales Herauslesen (Zuordnung der dargestellten Größen und Werte, Interpretation von zusammengesetzten Faktoren und Summanden), globales Herauslesen (Herauslesen von Abhängigkeiten und Zusammenhängen, Beachten der Gültigkeitsbedingungen)

Konstruktion: lokaler Aufbau (Eintragen von Werten oder Einführen von Variablen, Bestimmen von zusammengesetzten Faktoren und Summanden), globaler Aufbau (Auswahl der relevanten Größen inkl. Finden der Formelzeichen, Darstellen von Abhängigkeiten und Zusammenhängen, komplettes Übernehmen/Erinnern)

Arbeiten mit der Darstellung: Adaptieren (inkl. Umformen und Umstellen), Schlussfolgern weiterer Größen oder Zusammenhänge, Kontrollstrategien

Einbettung: Beschreibung einer Situation, übergeordnete Sichtweise

Berechnen: wird als darstellungsübergreifende Tätigkeit betrachtet, die mit algebraischen Ausdrücken, aber auch beispielsweise mit Diagrammen denkbar ist, und daher separat aufgeführt wird. (Vgl. Geyer, 2020, S. 41-45, S. 151-155)

Eine Lehrbuchanalyse von Uhden (2012) zeigt, dass bei Aufgaben in Physikschulbüchern der Klassenstufen 9 und 10 der Fokus meist auf Rechenaspekten liegt und Formeln als Methode zur Berechnung von Zahlenwerten dargestellt werden. Übersetzungs- oder Verknüpfungsprozesse zwischen Mathematik und Physik werden meist nicht gefordert. Auch eine neuere Untersuchung im Rahmen einer Masterarbeit an in Sachsen

zugelassenen Lehrbüchern für die Klassenstufe 8 bestätigt diese Tendenz. Von 187 untersuchten Aufgabenstellungen, sind 151 Standardaufgaben mit gegeben-gesucht-Lösung-Schema, 36 Aufgaben erfordern einen Darstellungswechsel (Hauspurg, 2015). Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass durch „typische“ Physikaufgaben insbesondere technische Fähigkeiten in Form von Rechenaufgaben gefördert werden. Diese Rechenaufgaben erfordern meist ein gegeben-gesucht-Lösung(-Antwortsatz)-Schema zur Bearbeitung. Solche klassischen Rechenaufgaben sollen neben Aufgaben mit Darstellungswechseln und dem Interpretieren einer Formel im Folgenden dargestellt werden.

Neben Rechenaufgaben ist aber auch eine Beschäftigung mit inhaltlichen Dimensionen einer Formel denkbar, zum Beispiel können Formeln in ihrer Funktion als „Wissensspeicher“ für Beschreibungen und Erklärungen genutzt werden. Dieser Aspekt von Formelnutzung spiegelt sich auch in der in Kapitel 3.3.3 dargestellten Lehrerbefragung von Strahl, Thiele und Müller (2013) wider, bei der das Berechnen von Werten nur einen Punkt unter vielen ausmacht. Auch die Beschreibungen der Operatoren in den Einheitlichen Prüfungsanforderungen für das Abitur (EPA) der Kultusministerkonferenz zeigen eine große Spannbreite denkbarer Aufgaben, von denen viele ein verbales Antwortformat verlangen. Zu nennen wären hier beispielsweise die Operatoren analysieren, begründen, beschreiben, beurteilen, darstellen, diskutieren, erklären, erläutern (Kultusministerkonferenz, 2004, S. 14-15). Bei Verwendung der physikalischen Fachsprache für die Lösung solcher Aufgaben ist es bei vielen dieser Operatoren sinnvoll und in Abhängigkeit der konkreten inhaltlichen Fragestellung (und Klassenstufe) angebracht, bei der Argumentation auch physikalische Formeln zu nutzen.

Rechenaufgaben

Rechenaufgaben im Physikunterricht sind häufig Textaufgaben. In einem kurzen Aufgabentext wird eine physikalische Situation beschrieben und eine Problem- oder Fragestellung daraus abgeleitet. Die SchülerInnen müssen dann aus dem Text die relevanten Werte selektieren (und als gegeben notieren), anschließend eine zur Situation (und den gegebenen Werten) passende Formel benennen und den gesuchten Wert mit Hilfe der Formel berechnen. In der Regel wird als Abschluss ein Antwortsatz verlangt, der den erhaltenen numerischen Wert wieder in den physikalischen Kontext der Aufgabenstellung einbettet. Sehr unterschiedlich kann bei diesen Aufgaben die Kontextorientierung sein. Muckenfuß (1995) fordert, den Physikunterricht grundsätzlich an „sinnstiftenden“ Kontexten auszurichten. Und empirische Ergebnisse legen nahe, dass die Auswahl des richtigen Kontextes das Interesse am Fach Physik stärken kann

(vgl. z. B. Lore Hoffmann, Häußler und Lehrke, 1998; Wodzinski, 2007). Ein solcher motivierender Kontext ist nicht gegeben, wenn dieser Kontext rein fachimmanent ist, also beispielsweise ohne äußere Motivation die Geschwindigkeit eines Wagens auf einer schrägen Ebene zu einem bestimmten Zeitpunkt berechnet werden soll.

Alternativ können Berechnungen auch innerhalb anderer Aufgabenstellungen notwendig sein, beispielsweise bei der tabellarischen Berechnung eines Wertes zur Auswertung eines Experimentes. In einem solchen Fall werden häufig nur Werte in den Taschenrechner eingetippt und die berechneten Werte notiert.

Aufgaben mit Darstellungswechseln

Aufgaben, die eine selbstständige Konstruktion bestimmter Darstellungsformen fordern, sind in den Bildungsstandards im Kompetenzbereich Kommunikation im Anforderungsbereich II („Geeignete Darstellungsformen nutzen“) und Anforderungsbereich III („Darstellungsformen selbstständig auswählen und nutzen“) anzusiedeln (Kultusministerkonferenz, 2005, S. 14). Aufgaben mit Darstellungswechseln können SchülerInnen in unterschiedlichen Graden von Offenheit dabei unterstützen, eine ausreichende Repräsentationskompetenz (s. Kap. 3.1) zu entwickeln, um geeignete Darstellungsformen für eine bestimmte Zielstellung zu wählen und selbstständig zu konstruieren. Im Sinne eines Scaffolding-Ansatzes können sie beispielsweise zunächst schrittweise bei der Konstruktion einer bestimmten Darstellung unterstützen. Mögliche Umsetzungen eines hohen Unterstützungsgrades wären zunächst schrittweise Anleitungen, wie beispielsweise das konkrete Vorgehen beim Herleiten einer Formel aus einem Graphen. Ein anderes Beispiel sind Zuordnungsaufgaben, bei denen unterschiedliche Darstellungsformen, die den gleichen Sachverhalt beschreiben, passend zueinander gefunden werden müssen, beispielsweise aus einer Auswahl von Beschreibungen eine Situation zu identifizieren, die zu einer gegebenen Formel passt.

Eine Laborstudie von Geyer (2020) legt außerdem nahe, dass geeignete Aufgaben, die Repräsentationswechsel von SchülerInnen verlangen, helfen können, strukturelles Denken bei SchülerInnen zu aktivieren und zu fördern.

Interpretieren einer Formel

Ein konkreter Darstellungswechsel ist die Übersetzung einer Formel in verbale Sprache. Eine solche Verknüpfung des algebraischen Ausdrucks mit verbalisierten Inhalten geschieht beim Interpretieren einer Formel.⁸ Bei der Interpretation einer Formel

⁸In den von der Kultusministerkonferenz formulierten einheitlichen Operatoren für das Fach Physik in den Einheitlichen Prüfungsanforderungen für das Abitur wird der Operator „interpretieren“ nur sehr

werden die in der Formel enthaltenen Informationen entpackt und verbalisiert. Hierzu zählt die Benennung der Formelzeichen, aber auch eine weitergehende Beschreibung dessen, was eine Formel inhaltlich ausdrückt. In fachdidaktischer Forschung und schulpraktischen Anregungen gibt es dabei keinen genauen Konsens, welche Inhalte hier zwingend erforderlich sind. Einige AutorInnen stellen aber Methoden vor, die die Verbalisierung bestimmter Inhalte einfordern. Diese Inhalte decken sich in unterschiedlichem Maß mit den in Kapitel 3.3.2 dargestellten theoretischen Überlegungen zur Bedeutung einer Formel. Der dort vorgestellte Lehransatz von Romer (1993) nimmt als Vermittlungsstrategie eine Zwischenrolle ein, die auch Grundlage für methodische Leitfäden für SchülerInnen sein könnte. Romer (1993) möchte in seiner Hochschullehre das „Lesen“ einer Formel bewusst einsetzen, um die Begeisterung für sein Fach, „the subject that is the most fun to teach and study and learn“ (Romer, 1993, S. 128), zu vermitteln. Er vergleicht diese Interpretation von Formeln mit der Interpretation von Gedichten oder Kurzgeschichten und betont, dass das Lesen einer Formel geübt werden muss und Unterstützung bedarf, denn: „Our students are not, to begin with, experienced at reading equations; it is our responsibility to open their minds to the pleasures to be found here.“ (Romer, 1993, S. 130) Wie genau dieses Üben aussehen kann und welche Hilfestellungen aus der physikdidaktischen Literatur bekannt sind, soll im Folgenden dargestellt werden.

Einige Physik-Lehrbücher stellen das Interpretieren von Formeln als eigene Methode in einer Schrittfolge vor. Im Schulbuch Level Physik für das Gymnasium Klassenstufe 8 in Sachsen findet sich folgendes Rezept für die Interpretation einer Formel:

1. „Nenne zunächst die physikalischen Größen, zwischen denen Zusammenhänge in der Gleichung dargestellt sind! Gehe auf wichtige Bedingungen ein, unter denen die Gleichung gilt, z. B. keine Aggregatzustandsänderung!
2. Leite aus der mathematischen Struktur der Gleichung Zusammenhänge zwischen physikalischen Größen ab! Gehe dabei z. B. auf direkte oder indirekte Proportionalität und auf wichtige Bedingungen ein, unter denen Zusammenhänge gelten!

$Q \sim m$, wenn $\Delta T = \text{konst.}$ und $c = \text{konst.}$

allgemein beschrieben als „kausale Zusammenhänge in Hinblick auf Erklärungsmöglichkeiten untersuchen und abwägend herausstellen“ (Kultusministerkonferenz, 2004, S. 15). Interpretieren meint somit hier eher das Interpretieren von Experimenten als das Interpretieren von Formeln. Und auch in den Kompetenzstandards für den Mittleren Schulabschluss (Kultusministerkonferenz, 2005) sind Formeln selbst nur implizit als Teil physikalischer Arbeitsweisen und Modellbildung, sowie als Teil physikalischer Kommunikationskompetenz zu finden, wie in der Einleitung zu Kapitel 3.3 ausgeführt wurde.

$Q \sim \Delta T$, wenn $m = \text{konst.}$ und $c = \text{konst.}$

3. Leite praktische Folgerungen aus den Zusammenhängen zwischen den Größen ab!“ (Meyer und Schmidt, 2005, S. 51)

Ein etwas ausführlicheres Vorgehen schlagen Bagno, Eylon und Berger (2011) vor. Sie entwickeln eine Unterrichtssequenz zur Interpretation einer Formel, die folgende Schritte vorsieht.⁹

1. Physikalische Bedeutung und Einheiten zu allen Formelzeichen notieren
2. Einheitengleichheit beider Seiten zeigen
3. Gültigkeitsbedingungen nennen
4. Beziehungen zwischen den einzelnen Größen mit Hilfe eines Graphen oder einer Zeichnung skizzieren
5. Extrem- und Spezialfälle beschreiben
6. Falls aus Produkten oder Quotienten zusammengesetzte Größen enthalten sind, Beschreibung der physikalischen Bedeutung dieser Komponenten der Formel
7. Inhaltliche Bedeutung der Formel mit eigenen Worten beschreiben (vgl. Bagno, Eylon und Berger, 2011, S. 79)

Im Vergleich zu den Inhalten, die Romer (1993) zum „Lesen einer Formel“ zählt (s. Kap. 3.3.2), fehlen hier insbesondere die erkenntnistheoretischen Betrachtungen über die Art der Aussage und die Herkunft der Formel. Alle dargestellten Ansätze zeigen, dass in der Fachliteratur Hinweise zu finden sind, wie SchülerInnen an das inhaltliche Arbeiten mit Formeln heranzuführen sind. Dies ist insbesondere vor dem Hintergrund der durch verschiedene Studien belegten Schwierigkeiten, die SchülerInnen mit der selbstständigen Verbalisierung von Formelbedeutungen zeigen, von großer Relevanz (s. Kap. 3.3.5).

Bei der Aufgabe, eine Formel zu interpretieren, ist jedoch kritisch zu reflektieren, dass diese mit der Formel erarbeiteten Inhalte in keinem Bezug zu einem praktischen Anwendungskontext oder einer konkreten physikalischen Aufgabenstellung stehen. Den SchülerInnen wird somit nicht explizit verdeutlicht, warum es wichtig ist, Inhalte mit einer Formel zu verbinden und eine Formel interpretieren zu können. Um diesen Aspekt zu berücksichtigen, wäre es sinnvoll, das Interpretieren einer Formel

⁹Dieses Vorgehen wurde in Janßen und Pospiech (2016b) in Form eines Formelsteckbriefes adaptiert.

beispielsweise als vorbereitende Aufgabe vor einer Anwendungsaufgabe zu nutzen, bei der ein physikalisches Phänomen mit Hilfe einer Formel in Form eines Fließtextes beschrieben und erklärt wird. Nach der Erklärung könnten SchülerInnen explizit dazu aufgefordert werden, die Rolle der Formel als Informationsträger zu reflektieren. Auf diesem Weg könnten sie im Sinne einer metarepresentational competence (s. Kap. 3.1) Formeln als Kommunikationsmittel wahrnehmen, das Inhalte zusammenfasst, und durch deren Interpretation viel physikalisches Wissen reaktiviert werden kann. Dieses Wissen wiederum kann durch den zu erklärenden Kontext eine relevante individuelle Bedeutung erhalten.

3.3.5. Lernschwierigkeiten in Bezug auf Formeln im Physikunterricht

Wie in den vorhergehenden Kapiteln dargestellt, sind Formeln ein wichtiger Bestandteil des Physikunterrichts. Gleichzeitig haben viele SchülerInnen Schwierigkeiten im Umgang mit diesen. Ein Aspekt dieses Problems sind technische mathematische Fähigkeiten, wie das formale Umstellen von Formeln, das richtige Umrechnen verschiedener Größen oder manchmal auch bereits das korrekte Eintippen von Werten in den Taschenrechner. Dieses Handwerkszeug ist in jedem Fall Voraussetzung für ein Beherrschen der Darstellungsform Formel und wird von einigen LehrerInnen bei ihren SchülerInnen bemängelt (vgl. z. B. Pospiech, Eylon *et al.*, 2019, S. 289). Der Schwerpunkt dieses Kapitels soll insbesondere auf Schwierigkeiten mit der nicht einfachen Verknüpfung der algebraischen Darstellungsform Formel mit physikalischen Inhalten und damit der strukturellen Rolle von Formeln liegen.

Konzeptuelles Verständnis mathematischer Ausdrücke im Physikunterricht

Verschiedene empirische Befunde weisen darauf hin, dass SchülerInnen insbesondere am konzeptuellen Verständnis mathematischer Ausdrücke scheitern, was sich beispielsweise in Darstellungswechseln zwischen unterschiedlichen Darstellungsformen zeigt, die voraussetzen, dass SchülerInnen wirklich verstehen, was eine Darstellungsform inhaltlich aussagt. So fällt es SchülerInnen und StudentInnen bereits innerhalb der Mathematik schwer, verbale Beschreibungen von Situationen in eine Formel zu übersetzen (vgl. z. B. Clement, Jack und Monk, 2011; Malle, 1982).

Gleichzeitig haben Lernende prinzipiell Probleme bei der Übertragung und Anwendung von aus dem Mathematikunterricht bekannten Konzepten in andere Bereiche. Dies zeigen Rebello und Cui (2008) für die Übertragung von Rechenfähigkeiten auf die Physik. Planinic *et al.* (2013) belegen diese Diskrepanz für das Verständnis von Graphen in Mathematik und Physik. Kimpel (2018) weist einen deutlichen Unterschied

zwischen mathematischen Kenntnissen und Fähigkeiten und ihrer erfolgreichen Anwendung im Kontext chemiebezogener Aufgaben in der Eingangsphase des Chemiestudiums nach. Das erlernte mathematische Grundlagenwissen ist somit häufig nicht anwendungsbereit und kann nur innerhalb gelernter Kontexte angewendet werden. In Bezug auf Formeln äußert sich diese Schwierigkeit der Übertragung von Wissen auch in Vorlieben von SchülerInnen bezüglich der Darstellungsweise von Formeln. So scheinen SchülerInnen solche Schreibweisen zu bevorzugen, die ihnen aus dem Mathematikunterricht bekannt sind, was sich beispielsweise in der Verwendung von Multiplikationssymbolen zeigt (vgl. Strahl, Grobe und Müller, 2010).

Zu dem Problem der Anwendung aus der Mathematik bekannter Konzepte kommt bei vielen SchülerInnen außerdem explizit ein fehlendes konzeptuelles Verständnis für mathematische Ausdrücke in der Physik. Dies trifft auch auf SchülerInnen zu, die in der Anwendung mathematischer Werkzeuge in der Physik erfolgreich sind (vgl. z. B. Kim und Pak, 2002). Diese Erkenntnis kann in Zusammenhang mit Problemlösestrategien („epistemic games“), die Tuminaro und Redish (2007) bei StudentInnen identifizieren, näher verstanden werden: Wenn mathematische Konzepte oder konkret Formeln in einem rein technischen Sinne verwendet werden, beispielsweise, wenn unreflektiert gegebene Größen in eine Formel eingesetzt werden („plug-and-chug-Verfahren“, s. Kap. 3.2), dann ist konzeptuelles Verständnis in einem strukturellen Sinne weder für die Lösung notwendig, noch wird es durch die Bearbeitung der Aufgaben gefördert.

Für College-StudentInnen können Eichenlaub und Redish (2019) zeigen, dass diese durchaus etablierte Strategien für den Einbezug physikalischer Inhalte in Problemlöseprozesse nutzen. So untersuchen sie beispielsweise Extrem- und Spezialfälle und machen Dimensionsanalysen. Ein ähnlich differenziertes Bild der Tätigkeiten von SchülerInnen der Sekundarstufe 1 bei der Lösung von Aufgaben mit Darstellungswechseln kann Geyer (2020) zeigen. Sie identifiziert auch solche Tätigkeiten, die einen deutlichen Bezug zu physikalischen Inhalten aufweisen und somit in einem strukturellen Sinne von den SchülerInnen angewendet werden. Gleichzeitig können in dieser Studie viele der identifizierten Schwierigkeiten von SchülerInnen auf ein eher technisches Vorgehen zurückgeführt werden, was noch einmal die Problematik einer alleinigen Fokussierung technischer Aspekte verdeutlicht. Auch Uhden (2012) stellt bei SchülerInnen während der Bearbeitung physikalischer Aufgaben eine Fokussierung auf technische Aspekte der Mathematisierung fest, was zu Schwierigkeiten im Problemlöseprozess führt. Er fasst diese Schwierigkeiten als schematisch-technischen Umgang mit Mathematisierungen und oberflächliche Übersetzungen zusammen (vgl. Uhden, 2012, S. 180-185).

Dieser Fokus auf technische Aspekte der Mathematik im Physikunterricht spiegelt

sich auch in einigen epistemologischen Einstellungen zur Rolle der Mathematik bei LehrerInnen wider, die Mathematik unter anderem ebenfalls als Werkzeug wahrnehmen (s. Kap. 3.3.5).

Es ist somit zwar häufig ein Fokus auf technische Fähigkeiten wahrzunehmen, viele SchülerInnen und StudentInnen zeigen aber durchaus Ansätze der Einbeziehung inhaltlich physikalischer und damit struktureller Aspekte beim Umgang mit mathematischen Darstellungsformen im Physikunterricht.

Schwierigkeiten im Umgang mit Formeln

Grundsätzlich empfinden SchülerInnen Formeln häufig als etwas Hilfreiches und Wichtiges im Physikunterricht (vgl. z. B. Müller und Heise, 2006). Schecker (1985) identifiziert bei SchülerInnen einen „Denkrahmen Formelfixierung“. SchülerInnen mit diesem Denkrahmen nehmen Formeln als etwas sehr Zentrales in der Physik wahr und empfinden im Gegensatz dazu beispielsweise die Einführung von Begriffen als „Geschwafel“ (Schecker (1985, S. 199), zit. n. Krey (2012, S. 133)). Vor diesem Hintergrund kann auch das Ergebnis einer Studie von Dee-Lucas und Larkin (1991) interpretiert werden, die einen negativen Einfluss von Formeln in algebraischer Schreibweise auf das konzeptuelle Verständnis von Beweisen feststellen. Dieses Ergebnis erscheint auf den ersten Blick widersprüchlich zu Ergebnissen von Müller und Heise (2006), die einen positiven Einfluss von Formeln in erklärenden Texten im Vergleich zu verbalen Ausdrücken auf die anschließende Lösefähigkeit von Aufgaben nachweisen. Während die Studie von Dee-Lucas und Larkin (1991) aber eher auf konzeptuelles Verständnis abzielen scheint, das eventuell durch eine Fokussierung auf die Formeln und ein Ausblenden des „Geschwafels“ (vgl. Schecker, 1985) um die Formel herum erschwert wird, sind Formeln für das Lösen von Aufgaben oftmals von großem Vorteil und können auch bei SchülerInnen positive Effekte wie kognitive Entlastung oder Zusammenfassung von Inhalten bewirken (s. Abschnitt über Funktionen der Mathematik in der Physik in Kap. 2.1.2).

Diese Einschätzungen decken sich auch mit Äußerungen, die SchülerInnen im Rahmen einer Interviewstudie von Angell *et al.* (2004) machen. Berechnungen mit Formeln zu machen, wird als (sehr) wichtig wahrgenommen (Angell *et al.*, 2004, S. 694), die Anwendung der Mathematik im Physikunterricht wird folgendermaßen beschrieben: „simple and uncomplicated calculations“, „everyone knows enough maths to do calculations in physics.“ (Angell *et al.*, 2004, S. 692). Angell *et al.* (2004, S. 693) ziehen das Resümee, dass die beteiligten SchülerInnen Mathematik als die Sprache der Physik und als hilfreiches Werkzeug bei der Beschreibung physikalischer Prozesse und Phä-

nomene wahrnehmen.

Neben dieser positiven Bewertung von Formeln, die im Falle der Untersuchung von Schecker (1985) leider auch zu einer Abwertung inhaltlicher physikalischer Konzepte führen kann, gibt es aber auch Untersuchungen, die nahelegen, dass SchülerInnen im Umgang mit Formeln durchaus Schwierigkeiten haben. So nennen SchülerInnen in der Befragung von Angell *et al.* (2004) neben den oben beschriebenen positiven Merkmalen auch Schwierigkeiten, die sich insbesondere auf die Übersetzung zwischen Mathematik und Physik beziehen und somit auf Schwierigkeiten im strukturellen Umgang mit Formeln hinweisen. Konkret wird die Kombination mehrerer Formeln und das Hantieren mit Symbolen anstelle von Ziffern bei Kalkulationen genannt (vgl. Angell *et al.*, 2004, S. 692). Einige SchülerInnen haben auch bereits Schwierigkeiten bei der Zuordnung der richtigen physikalischen Termini zu den Formelzeichen (vgl. Strahl, Schleusner *et al.*, 2010, S. 23) und nennen es explizit als Schwierigkeit, dass einige Formelzeichen in der Physik doppelt belegt sind (vgl. Pospiech und Oese, 2013; Angell *et al.*, 2004, S. 204 bzw. S. 693). Außerdem zeigen sie Schwierigkeiten bei der Benennung von Gültigkeitsbedingungen oder der Interpretation von Spezialfällen (vgl. Bagno, Eylon und Berger, 2011, S. 77, S. 81). All diese Punkte deuten darauf hin, dass es SchülerInnen schwer fällt, Formeln mit physikalischen Theorien zu verknüpfen, sie also in einem strukturellen Sinne anzuwenden.

Die Wichtigkeit von Formeln ist SchülerInnen somit bewusst. Formeln erscheinen insbesondere bei der Lösung bestimmter Aufgaben sehr hilfreich und technisches Abarbeiten von Aufgaben mit Formeln stellt für SchülerInnen meist kein großes Problem dar. Gleichzeitig treten aber häufig dann Schwierigkeiten auf, wenn es um inhaltliches Arbeiten mit Formeln geht. Dieses inhaltliche Arbeiten wird in sehr konkreter Weise gefordert, wenn SchülerInnen die inhaltliche Aussage einer Formel selbstständig wiedergeben sollen. Schwierigkeiten mit diesem Aspekt des strukturellen Umgangs mit Formeln sollen im Folgenden ausgeführt werden.

Schwierigkeiten bei der Verbalisierung von Formelbedeutungen

In verschiedenen qualitativen Studien zeigt sich, dass ein Großteil teilnehmender SchülerInnen Schwierigkeiten hat, die inhaltliche Bedeutung einer Formel mit eigenen Worten wiederzugeben (kann als Teil der Interpretation von Formeln, wie sie als Methode in Kapitel 3.3.4 beschrieben wurde, gesehen werden).

In der Erprobung einer Unterrichtsmethode zur Förderung des Formelverständnisses mit 260 israelischen SchülerInnen der Highschool sind nur 13% von berück-

sichtigen 72 SchülerInnen hierzu in der Lage ¹⁰. Während 41% der SchülerInnen gar keine Antwort geben und 10% eine falsche, sind 36% immerhin in der Lage, die Formel in Wörter zu übersetzen, also Formelzeichen und mathematischen Symbolen die richtigen Termini und Operationen zuzuordnen. Ein Beispiel für $\sum \vec{F} = m\vec{a}$ ist die Formulierung „Die Summe der wirkenden Kräfte ist gleich die Masse multipliziert mit der Beschleunigung.“ (Bagno, Eylon und Berger, 2011, S. 81). Ähnliche Schwierigkeiten zeigt auch eine kleinere Befragung von Strahl, Schleusner *et al.* (2010). Hier werden in der Regel sehr knapp der dargestellte physikalische Sachverhalt und die Formelsymbole benannt. Und auch Pospiech und Oese (2013) konnten eine Fokussierung auf eher technische als strukturelle und somit inhaltliche Aspekte bei der Beschreibung von Formeln feststellen. Diese Erkenntnisse decken sich mit der Erkenntnis, dass SchülerInnen bei Repräsentationswechseln in der Mathematik insbesondere mit Wechseln zu verbalen Darstellungsformen, also Verbalisierungen, Schwierigkeiten zeigen (vgl. Bossé, Adu-Gyamfi und Cheetham, 2011, S. 127).

Schwierigkeiten mit Bedeutung mathematischer Inhalte

Mathematische Zeichen und Operatoren tragen eine eigene Semantik. Diese kann von SchülerInnen nicht oder missverstanden werden, was sich auf ein negatives Formelverständnis auswirkt. Im Folgenden sollen zwei Aspekte des Verständnisses mathematischer Ausdrücke beschrieben werden, die zu Fehlvorstellungen bezüglich der Bedeutung von Formeln führen können: Vorstellungen zum Gleichheitszeichen und zu mathematischen Operatoren.

Aus der Mathematikdidaktik ist bekannt, dass SchülerInnen der Übergang von der Arithmetik zur Algebra schwerfällt. Dies ist insbesondere auf ein notwendiges Umdenken und Uminterpretieren zurückzuführen von algebraischen Ausdrücken als algebraische Operationen, die auf eine Zahl wirken, hin zu algebraischen Ausdrücken als Objekte mit eigener Bedeutung (vgl. Heck und Buuren, 2019, S. 58). Dies kann auch eine Erklärung dafür sein, warum SchülerInnen Formeln vorrangig in einem technischen Sinne als „Aufforderung zum Rechnen“ wahrzunehmen scheinen. Dies ist ein Konzept, das ihnen aus dem Anfangsunterricht Mathematik bekannt ist und auch innerhalb der Mathematik selbst fällt ihnen der Konzeptwechsel hin zu einem algebraischen Ausdruck mit eigener Semantik schwer.

Eine weitere Schwierigkeit kann die inhaltliche Bedeutung mathematischer Opera-

¹⁰Als korrekte Antwort werten die Autorinnen eine Beschreibung des physikalischen Vorganges, den die Formel beschreibt, z. B. für die Formel $x = x_0 + v_0 + \frac{1}{2}at^2$: „The formula expresses the position of an object at any time, starting with a specific initial velocity and moving at constant acceleration.“ (Vgl. Bagno, Berger und Eylon, 2008, S. 78)

toren sein. Die zuvor beschriebenen und in Tabelle 3.1 zusammengestellten „symbolic forms“ von Sherin (2001) sind solche inhaltlichen Interpretationen. Diese können für ein konzeptuelles Formelverständnis hilfreich, aber auch hinderlich sein. So identifiziert Sherin (2001, S. 507) Schwierigkeiten, die auf „falsche“, also zum physikalischen Kontext unpassende, „symbolic forms“ hindeuten. Für das Verständnis von Formeln ist es somit relevant, die Verstehensmuster der mathematischen Operatoren zu hinterfragen und eine Passfähigkeit zur durch die Formel beschriebenen physikalischen Situation zu diskutieren. So macht es beispielsweise bei der Formel $s = s_0 + v \cdot t$ Sinn, von der „symbolic form“ Basis und Änderung auszugehen, weniger von konkurrierenden Termen, obwohl beide für die gleiche mathematische Operation (Addition zweier Größen) stehen.

Epistemologische Einstellungen Lernender zu Formeln

Nachdem einige grundsätzliche Schwierigkeiten beschrieben wurden, die SchülerInnen im Umgang mit Formeln zeigen, soll es im Folgenden um Einstellungen Lernender zu Formeln gehen. Dies beinhaltet auch den Aspekt, welches Wissen und welche Fähigkeiten für Lernende selbst zum Verständnis einer Formel gehören.

In einer explorativen Interviewstudie mit 20 Studierenden unterschiedlichen Erfahrungsgrades (erstes Studienjahr bis hin zu Promovierenden) stellen Domert *et al.* (2012) sechs verschiedene Komponenten epistemologischer Einstellungen zu Formeln fest, indem sie die Studierenden dazu befragen, woran sie festmachen würden, dass sie eine Formel verstanden hätten. Die beschriebenen Komponenten epistemologischer Einstellungen sind:

Formelzeichen: Die in der Formel vorkommenden Formelzeichen können den physikalischen Größen zugeordnet werden.

physikalischer Hintergrund: Die der Formel zugrundeliegende physikalische Theorie wird erkannt. Dies beinhaltet die physikalische Bedeutung der einzelnen Größen, die zugrundeliegenden physikalischen Konzepte und Prinzipien und die Herleitung der Formel.

(mathematische) Struktur: Die Struktur der Formel wird erkannt. Es gibt ein Verständnis dafür, wie die einzelnen Größen der Formel zueinander in Beziehung stehen, je nachdem, an welcher Position sie in der Formel stehen, und wie sich die Formel als Gesamtterm verhält.

Alltag: Die Formel wird in Bezug zum Alltag gesetzt. Dies beinhaltet sowohl die

Kenntnis konkreter Anwendungsmöglichkeiten in alltäglichen Situationen, als auch das Nutzen alltagsnaher Analogien, um die Formel zu verstehen.

Rechnen: Wissen darüber, *wie* eine Formel in Aufgaben benutzt werden kann. Dies beinhaltet insbesondere technische Aspekte wie die Kenntnis notwendiger mathematischer Operationen und die Identifizierung notwendiger gegebener und ermittelbarer gesuchter Größen.

Anwendungsbereich: Wissen darüber, *wann* eine Formel in Aufgaben benutzt werden kann. Dieser Aspekt beinhaltet die Kenntnis von physikalischen Bedingungen und Hintergrundinformationen zur Formel: ihr Gültigkeitsbereich, zugrundeliegende Näherungen und Idealisierungen, sowie das Teilgebiet der Physik, dem die Formel zuzuordnen ist (z. B. Optik oder Mechanik). (Vgl. Domert *et al.*, 2012, S. 19-20)

In einer anderen Befragung von 42 SchülerInnen im Alter von 14 bis 18 Jahren zu der gleichen Frage identifiziert Hechter (2010) vier unterschiedliche thematische Gruppen in den Antworten: Die pragmatische Position besagt, dass eine Formel dann als verstanden wahrgenommen wird, wenn sie in Aufgaben angewendet werden kann. Eine weitere Gruppe bezieht ihr Verständnis einer Formel insbesondere auf die Kenntnis und das Verständnis der mathematischen Herleitung der Formel, das ihnen auch dabei helfen würde, Problemstellungen mit der Formel zu lösen. Eine dritte Gruppe zerlegt das Verständnis der gesamten Formel in viele kleine Einzelteile: Das Gesamtverständnis setzt sich dann zusammen aus dem Verständnis der einzelnen Größen und ihren Einheiten. Auch diese Gruppe benennt, dass ihnen dieses Wissen dabei helfe, Probleme mit der Formel zu lösen. Die vierte Gruppe schließlich nennt eine allgemein ausgedrückte umfassende Formelbedeutung. Sie sehen die Formel als Darstellungsform, die ihnen beim Verstehen physikalischer Prozesse helfen kann und machen das Verständnis einer Formel selbst daran fest, dass sie diese anderen erklären können.

In einer offenen schriftlichen Befragung von Studierenden in Schweden, Australien und den USA (N=356) ermitteln Airey, Lindqvist und Kung (2019) zehn inhaltliche Themen, die Studierende auf die Frage hin, woran sie erkennen, dass sie eine physikalische Formel verstanden hätten, beschreiben. Diese Themen sind Significance (Wissen, warum, wann und wo Formel genutzt werden kann), Origin (Herleitung und historischer Hintergrund), Description (graphische Darstellung von Zusammenhängen, Verknüpfung zu Situationen oder Experimenten), Prediction (Formel nutzen, um Verhalten eines Systems vorherzusagen), Parts (Umstellen der Formel, Verständnis der einzelnen Terme), Relationships (Verknüpfungen zu anderen Formeln oder

Herleitung aus anderen Formeln), Calculations (Formel benutzen, um Aufgaben zu rechnen), Explanation (Formel jemand anderem erklären), Repetition (Formel wurde mehrfach gesehen und benutzt), Memorization (Formel kann wiedergegeben werden) (vgl. Airey, Lindqvist und Kung, 2019, S. 234-235).

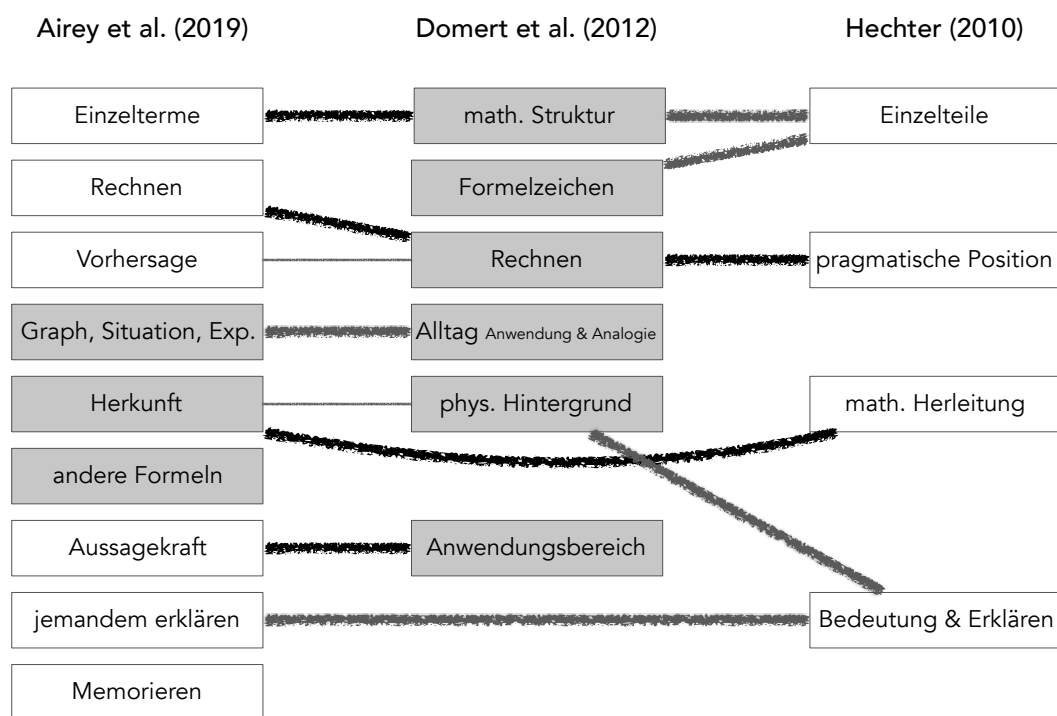


Abbildung 3.7.: Ergebnisse unterschiedlicher Studien zur Frage, was für SchülerInnen zum Formelverständnis gehört

In Abbildung 3.7 sind die Ergebnisse der beschriebenen Studien zusammengefasst dargestellt. Kategorien, die in allen Studien ähnlich sind, sind miteinander verbunden. Je dicker und dunkler diese Verbindung ist, desto größer sind die Übereinstimmungen in der Beschreibung der Kategorie. Grau hervorgehoben wurden die Kategorien, die im Folgenden als Gesamtergebnis der drei Studien genutzt werden sollen. Vergleicht man diese Kategorien mit den für LehrerInnen gefundenen Gruppen bezüglich der Einstellung zur Rolle der Mathematik im Allgemeinen (Kap. 3.3.3, Abb. 3.6), dann wird deutlich, dass die Kategorien Rechnen beziehungsweise pragmatische Position und auch das Memorieren Ähnlichkeit mit der eher technisch orientierten Rolle aufweist, die anwendungsorientierte Rolle mit den Aspekten Situation, Experiment und Alltag, die strukturelle Rolle spiegelt sich hingegen in den meisten anderen gefundenen Aspekten, die von SchülerInnen und StudentInnen genannt werden, da diese zumin-

dest in Teilen immer eine explizite inhaltliche Verknüpfung mit der physikalischen Bedeutung verlangen und somit das konzeptuelle, inhaltliche Arbeiten mit Formeln fokussieren.

Neben diesen expliziten Befragungen gibt es auch Studien, die im Rahmen von Problemlöseaufgaben das Verhalten von Studierenden untersuchen und daraus auf zugrundeliegende Einstellungen und Strategien beim Umgang mit Mathematik in der Physik schließen. Grundlegend ist in diesem Bereich die Identifikation von „epistemic games“ durch Tuminaro und Redish (2007). Diese „epistemic games“ sind ähnlich zu kognitiven Schemata zu verstehen, die bei der Bearbeitung bestimmter Aufgaben oder der Rekonstruktion von Wissen genutzt werden. Die identifizierten „epistemic games“ sind in Tabelle 3.2 dargestellt und beschrieben durch ihre äußere Gestaltung (genutzte Darstellungsformen) und ihren grundsätzlichen Ablauf. Auf dieser Arbeit aufbauend analysieren Bing und Redish (2009) vier „epistemic framing clusters“, die als Einstellungen den Aktivitätsmustern („epistemic games“) zugrundeliegen. Diese rekonstruierten Framing Cluster sind in Tabelle 3.3 dargestellt und beschrieben.¹¹¹²

Die aufgeführten epistemologischen Einstellungen zeigen zum Teil einen eher technischen oder strukturellen Blick auf Formeln. In der Studie von Domert *et al.* (2012) werden von den meisten Studierenden die Aspekte „Was bedeuten die Formelzeichen“ und „Wie wird eine Formel angewendet?“ genannt. Dies zeigt, dass die Verknüpfung mit der Physik durch die Formelzeichen zwar von vielen Befragten als wesentlicher Punkt genannt wird, am zweithäufigsten aber die Rolle von Formeln als Werkzeug für eine Berechnung gesehen wird. Auch die Gruppen bei Hechter (2010) weisen fast alle den Aspekt der Verwendung von Formeln für das Lösen von Aufgaben auf. Besonders ausgeprägt ist diese Einstellung bei der pragmatischen Gruppe. Bei den von Tuminaro und Redish (2007) identifizierten „epistemic games“ stechen insbesondere das Plug-and-Chug-Verfahren und Transliteration to Mathematics als rein technische Prozesse ohne strukturelle Argumentationen hervor. Ähnlich ist auch das epistemic

¹¹Tuminaro und Redish (2007, S. 4) definieren „epistemic games“ als: „a coherent activity that uses particular kinds of knowledge and processes associated with that knowledge to create knowledge or solve a problem.“ Tuminaro und Redish (2007, S. 5) verwenden den Begriff epistemic form: „The epistemic form is a target structure, often an external representation that helps guide the inquiry during an epistemic game.“ Als wesentliche weitere Komponente nennen Tuminaro und Redish (2007) die Struktur, eine Art Handlungsabfolge: „The structural components of epistemic games include the entry and ending conditions of the game and the moves. [...] The moves in an e-game are the steps and procedures that occur in the game.“ (Tuminaro und Redish, 2007, S. 5) Bing und Redish (2009, S. 1) beschreiben den Begriff epistemic framing cluster indirekt: „we have used the analytical tool of epistemological framing. This refers to the student’s perception or judgment (unconscious or conscious) as to what class of tools and skills are appropriate to bring to bear in a particular context or situation.“

¹²Die Übersetzung der epistemic framing cluster orientiert sich an Krey (2012, S. 136)

framing cluster „Calculation“ von Bing und Redish (2009) zu verstehen, bei dem die Korrektheit eines Ergebnisses mit einem technisch mathematisch richtigen Vorgehen validiert wird. Auch bei dem Cluster Invoking Authority wird in keiner Weise inhaltlich argumentiert. Diese Ergebnisse zeigen deutlich, dass es zahlreiche Indikatoren dafür gibt, dass zumindest ein Teil der Lernenden vorrangig technisch arbeitet und argumentiert und physikalische Inhalte beim Arbeiten mit Formeln in einigen Fällen nicht berücksichtigt werden.

Eine Möglichkeit, diesem technischen Fokus, der Formeln als Werkzeuge für Berechnungen und Beschreibungen erscheinen lässt, entgegenzuwirken, präsentieren Karam und Krey (2015). In einem Seminar für Studierende des Lehramtes Physik vermitteln sie verstärkt Formeln als Möglichkeit, etwas zu erklären und zu verstehen, um so ein eher strukturelles Verständnis von Formeln zu fördern (vgl. Karam und Krey, 2015, S. 662). Sie können zeigen, dass viele der beteiligten Studierenden die Wichtigkeit erkannten, ihr Repertoire an möglichen Erklärungen zu Formeln zu erweitern und „ungewöhnliche“ Fragen an Formeln zu stellen. Dies zeigt, dass eine Auseinandersetzung mit Formeln aus einer strukturellen Perspektive heraus einen technischen Fokus durchaus verändern kann (vgl. Karam und Krey, 2015, S. 695). Dieses grundsätzliche Ergebnis sollte auch auf Schulunterricht übertragbar sein: Wenn SchülerInnen ein besseres strukturelles Verständnis von Formeln im Physikunterricht erlangen sollen, dann müssen selbstverständlich auch dementsprechende Lerngelegenheiten angeboten werden. Formeln sollten auch, aber nicht ausschließlich, für Rechenaufgaben genutzt werden. Sie sollten aber ebenfalls Informationsquelle für Erklärungen sein und Anlass bieten, sich inhaltlich mit der Physik der Formel zu beschäftigen.

epistemic game	äußere Gestaltung	Struktur
Mapping Meaning to Mathematics	Formeln und ggf. verbale Interpretationen	ausgehend von konzeptuellem Verständnis einer physikalischen Situation werden quantitative Lösungen erarbeitet
Mapping Mathematics to Meaning	Formeln und ggf. verbale Interpretationen	ausgehend von einer Formel wird eine konzeptuelle Erklärung erarbeitet
Physical Mechanism Game	verbale Beschreibung mit physikalischen Prinzipien	Erklärung des Problems basiert auf intuitivem Verständnis des physikalischen Hintergrunds
Pictorial Analysis	graphische Darstellungen (z. B. Schemata, Schaltkreise, Diagramme)	die Beziehungen zwischen für das Problem relevanten Größen werden durch graphische Repräsentationen analysiert
Recursive Plug-and-Chug	Formeln	Bekannte Größen werden in eine Formel gesteckt und numerische Lösungen ausgegeben, ohne dass das Ergebnis konzeptuell verstanden wird
Transliteration to Mathematics	Formeln	Problemlösestrukturen aus bekannten Problemem werden adaptiert, die gegebenen Größen werden ohne konzeptuelles Verständnis direkt in diese Lösungspattern eingegeben

Tabelle 3.2.: Beschreibung von „epistemic games“ nach Tuminaro und Redish (2007, S. 5-8)

epistemic framing cluster	Begründungen	weitere Indikatoren der Cluster
Calculation	Das korrekte Ausführen von Algorithmen führt zu vertrauenswürdigen Ergebnissen	Betonung technischer Korrektheit, einfache mathematische Begründungen (chaining): „Ich brauche dies, um das zu bekommen“
Physical Mapping	Ergebnisse werden durch einen Vergleich mathematischer Ergebnisse und physikalischer Beobachtungen oder Erwartungen geprüft	Verwendung von Diagrammen, Gestikulieren
Invoking Authority	Ergebnisse und Lösungswege werden durch sichere Quelle (z. B. LehrerIn) abgesichert	Zitieren einer Regel, Abwesenheit phys. Argumentationsketten, wenig Bestätigung durch Struktur
Mathematical Consistency	Ähnlichkeit oder logische Verknüpfung mit anderer mathematischer Idee bietet Absicherung	Nutzen von Analogien zu anderen mathematischen Ideen, Verwenden mathematischer Kategorisierung

Tabelle 3.3.: Beschreibung von „epistemic framing cluster“ nach Bing und Redish (2009, S. 10)

4. Verbale Kommunikation und Kommunikationsschwierigkeiten im Physikunterricht

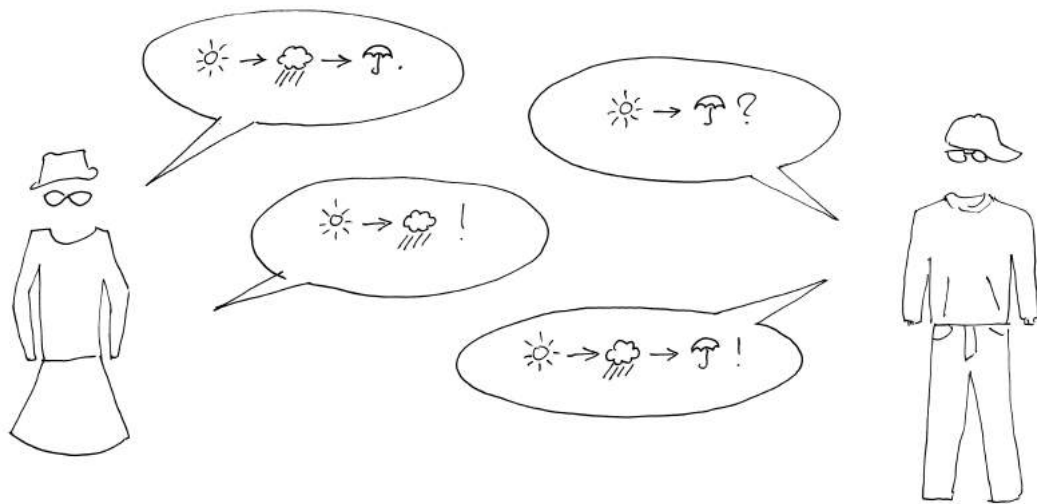


Abbildung 4.1.: Kommunikation als Prozess der Bedeutungsaushandlung

Lernen im Unterricht geschieht über Kommunikation. Kommunikation findet dabei zwischen LehrerIn und SchülerInnen und auch zwischen SchülerInnen und SchülerInnen statt. Dieser Arbeit liegt ein konstruktivistisches Grundverständnis von Lernen zugrunde. Kommunikation dient in diesem Sinne nicht der reinen Übertragung von Informationen, die ein Lernender übernimmt und als Information speichert, sondern vielmehr wird Sprache als Mittel zur aktiven Aushandlung von Bedeutungen verstanden. In der sprachlichen Interaktion wird Wissen neu konstruiert, es besteht die Möglichkeit, eigenes Verständnis zurückzuspiegeln und nach einem Feedback des Gegenübers gegebenenfalls anzupassen. Sprache bietet den KommunikationsteilnehmerInnen die Möglichkeit, Informationen anzubieten und Bedeutungen durch Rück-

fragen im Gespräch auszuhandeln und eigene Interpretationen abzusichern.¹ Ein stark vereinfachtes Beispiel stellt die in Abbildung 4.1 dargestellte Situation dar: Anna erzählt, dass zunächst die Sonne schien und es dann zu regnen begann und sie daher einen Schirm benötigte. Paul hat die Information des Wetterumschwungs (akustisch) nicht verstanden und kann seine Interpretation („Die Sonne hat geschienen und Anna hat einen Schirm benutzt“) zurückspiegeln, die Anna daraufhin korrigiert.

Bei einem solchen Kommunikationsprozess treten immer auch Kommunikationsschwierigkeiten auf, die Lernen erschweren oder gar verhindern können. Diese Kommunikationsschwierigkeiten sind im Physikunterricht häufig auch auf Unterschiede zwischen Fach- und Alltagssprache und daraus resultierende Missverständnisse zurückzuführen (vgl. z. B. Apolin, 2002). Dieses Spannungsfeld von Fachsprache und Alltagssprache ist im Physikunterricht oft präsent. Physikunterricht verfolgt das Ziel, SchülerInnen in einem rezeptiven und produktiven Sinne fachsprachlich kompetent in die Welt zu entlassen und sie somit handlungs- und urteilsfähig zu machen. Dieses Ziel ist zum einen dem Fach immanent, da Fachsprache zum Fach selbst gehört und somit neben den Fachinhalten ein wichtiges Lernziel darstellt, um das Fach und seine Diskurse zu verstehen. Zum anderen ist das Ziel der kommunikativen Kompetenz in den Bildungsstandards der Kultusministerkonferenz und in den Lehrplänen und Curricula der Bundesländer fest verankert. Um physikalische Sprache aber nicht als leere Bedeutungshülle zu erlernen, muss Unterricht in einer für SchülerInnen verständlichen Sprache stattfinden, damit sie beispielsweise Bedeutungen von Fachbegriffen konstruieren können und sich ein konzeptionelles Verständnis physikalischer Begriffe und Prozesse aufbauen können. Daher soll im Folgenden nach einer kurzen sprachwissenschaftlichen Grundlegung zur Zeichentheorie der Sprache das Verhältnis von Alltagssprache und Fachsprache im Physikunterricht beleuchtet werden. Hier zeigt sich eine gewisse Begriffsvielfalt in der fachdidaktischen Forschung:

- Leisen spricht von der Trias *Alltagssprache – Unterrichtssprache – Fachsprache*
- Bei Wagenschein finden sich die Begriffe *mündliche Muttersprache – schriftliche Alltagssprache – Fachsprache*
- Muckenfuß spricht von *Umgangssprache – Fachsprache – Alltagssprache*
- Rincke nutzt die Begriffe *Alltagssprache – Bildungssprache – Fachsprache*.

Aus der Varietätenlinguistik heraus wird für diese Arbeit die Verwendung der Begriffe *Alltagssprache*, *Unterrichtssprache* und *Fachsprache* begründet. Diese Begriffe sollen

¹Eine ausführlichere Diskussion des Kommunikationsbegriffes und kommunikativer Prozesse im Physikunterricht findet sich in Kulgemeyer (2010), auf den an dieser Stelle verwiesen sei.

analysiert (Kap. 4.2) und Merkmale der einzelnen Sprachebenen aus der Sprachwissenschaft heraus beschrieben werden (Kap. 4.3). Im Anschluss werden wesentliche fachdidaktische Erkenntnisse aus diesem Bereich und konkrete methodische und inhaltliche Implikationen für den Physikunterricht dargestellt, auf denen diese Arbeit aufbaut (Kap. 4.4).

4.1. Theoretische Vorüberlegungen aus der Sprachwissenschaft: Was ist Sprache?

Wollen wir verstehen, welche Rolle Sprache im Physikunterricht und damit im Vermittlungs- und Verstehensprozess hat, so lohnt sich ein Blick auf sprachwissenschaftliche Grundlagen zur Semiotik und Semantik (Theorie der Zeichen und ihrer Bedeutungen). Diese können uns helfen, ein grundlegendes Verständnis aufzubauen, wie Sprache und Bedeutungszuweisung zu sprachlichen Symbolen funktioniert und an welchen Stellen im Physikunterricht Kommunikationsschwierigkeiten aufgrund von sprachlichen Verständnisproblemen auftauchen können. Unter sprachlichen Verständnisproblemen werden hier alle Verständnisprobleme zusammengefasst, die auf fehlendem sprachlichen Verstehen basieren, also vereinfacht gesagt auf einer nicht übereinstimmenden Konstruktion und Zuordnung von Bedeutungen zu Symbolen bei KommunikationspartnerInnen basieren.

Grundlegende Überlegungen zur Natur sprachlicher Zeichen führten zum semiotischen Dreieck oder der Zeichentriade nach Peirce, dargestellt in Abbildung 4.2. Peirce beschreibt die Wechselwirkungen des *Zeichens* mit dem *Objekt*, das es bezeichnet, und dem *Zeichenbenutzer*, der Zeichen und Objekt erst miteinander verbinden muss und kognitiv seine eigene Interpretation des Zeichens, sein Konzept des Objektes, erinnert: den Interpretanten. Dieser ist nicht identisch mit dem Objekt selbst und insbesondere wenn zwei Personen miteinander kommunizieren, müssen sie bei Verwendung desselben Zeichens (also beispielsweise Wortes) nicht den gleichen Interpretanten imaginieren. Peirce (1931–1935) definiert:

„A sign, or representamen, is something which stands to somebody for something in some respect or capacity. It addresses somebody, that is, creates in the mind of that person an equivalent sign, or perhaps a more developed sign. That sign which it creates I call the interpretant of the first sign. The sign stands for something, its object. It stands for that object not in all respects, but in reference to a sort of idea, which I have sometimes called the ground of the representamen.“ (Peirce, 1931–1935, II S. 228)

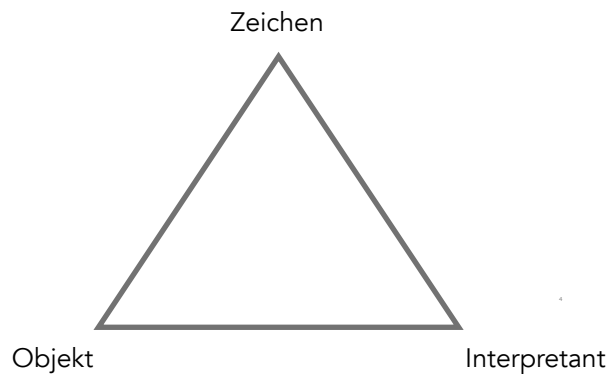


Abbildung 4.2.: Semiotisches Dreieck oder Zeichentriade nach Peirce (1931–1935)

Während Peirce noch davon ausgeht, dass ein Zeichen etwas außerhalb der Sprache darstellt, ein Objekt, betont de Saussure die Bedeutung des Sprachbenutzenden, ohne den oder die ein (sprachliches) Zeichen keinerlei Bedeutung besitzt. Er unterscheidet zwischen *langue* (dem Sprachsystem) und *parole* (dem individuellen konkreten Sprachgebrauch). Ein Zeichen hat nach de Saussure zwei Seiten: den *Zeicheninhalt* (im Original „signifié“), und den *Zeichenausdruck* (im Original „signifiant“) (s. Abb. 4.3). Der *Zeicheninhalt* meint hierbei das Konzept, das ein Sprachgebraucher von einem Symbol hat, also beispielsweise das eigene Konzept des Begriffs Baum. Der *Zeichenausdruck* meint das Lautbild eines Wortes, das er vernimmt oder bildet, im Beispiel das gesprochene Wort Baum. An anderer Stelle benutzt de Saussure auch die Begriffe *concept* und *image acoustique*, die besonders betonen sollen, dass das Zeichen als Ganzes nur als internes Konzept des Sprachbenutzers existiert. Im Zeichenverständnis de Saussures gibt es somit kein von der Sprache losgelöstes, in der Welt wahrnehmbares Referenzobjekt mehr. (Vgl. Linke, Nussbaumer und Portmann, 2004, S. 30-33)

Heywood und Parker (2010) beziehen dieses Zeichenkonzept auf Kommunikation im Physikunterricht:

„In challenging the perception that language is a tool that is applied to developing an understanding of concepts encountered in learning science, there is a subtle shift in emphasis from the idea that reality is ‘out there’ as phenomena reflected in language, towards a notion that reality is produced by language: an ontology compatible with a dialogic in which meaning is

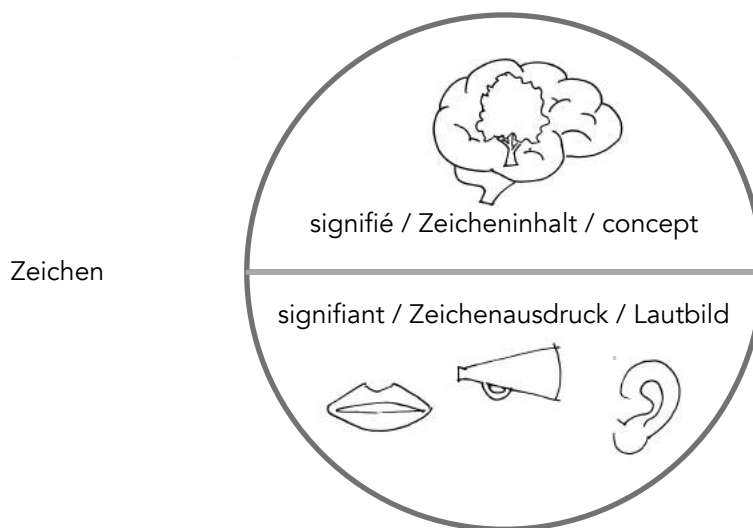


Abbildung 4.3.: Zwei Seiten eines Zeichens nach de Saussure

derived in discourse between teacher and learner and through peer group interaction.“ (Heywood und Parker, 2010, S. 93)

De Saussures Zeichentheorie liefert uns somit die Grundlage für ein konstruktivistisches Verständnis von Kommunikation allgemein und somit auch für Kommunikations- und Lehr-Lern-Prozesse im Physikunterricht. Wenn wir sprachliche Zeichen nicht mehr als reines Werkzeug zur Übermittlung von Inhalten sehen, sondern erkennen, dass Bedeutung von Sprache immer ausgehandelt werden muss, bedeutet dies auch für den Physikunterricht, dass SchülerInnen sich die Bedeutung von Fachtermini in kommunikativen Prozessen selbst konstruieren müssen und nicht lediglich die Definition eines Begriffs abschreiben und ihn danach richtig verstehen und benutzen können. Konkretisierungen dieses grundlegenden Gedanken finden sich in der physikdidaktischen Forschung beispielsweise bei Rincke (2010) wieder. Seine Überlegungen werden unter 4.4.3 dargestellt.

4.2. Das Verhältnis von Alltagssprache, Unterrichtssprache und Fachsprache im Physikunterricht

Die Entwicklung der Zeichentheorie, wie sie in Kapitel 4.1 dargestellt wurde, zeigt eine grundsätzliche Veränderung der sprachwissenschaftlichen Sicht auf Sprache.²

²Innerhalb der Sprachwissenschaft ist insbesondere die kommunikativpragmatische Wende ab Anfang der 1970er Jahre als Umbruch zu nennen. Eine prinzipielle Hinwendung zur konkreten Kommuni-

Ähnlich hat sich auch die Sicht der Fachdidaktik auf Sprache und ihre Rolle in Vermittlungskontexten verändert. Eine Übersicht verschiedener Sichtweisen auf Sprache aus fachdidaktischer Sicht findet sich in Carlsen (1998). Bezugnehmend auf Lev Wygotsky, in dem er die Ursprünge zeitgenössischer Forschung über Sprache und Lernen sieht, beschreibt er den grundsätzlichen Unterschied zwischen dem Erlernen der Erstsprache im Kindesalter, das von der alltäglichen Erfahrung hin zu einem abstrakten Konzept eines Begriffes geht, und der Wissenschaft, in der die Konzepte selbst häufig abstrakt sind und neue Konzepte aus formalen Strukturen entstehen. Hierin begründet sieht er auch einen entscheidenden Unterschied zwischen dem Erlernen einer Fremdsprache und einer Fachsprache: Während im Fremdsprachenlernen neue Begriffe für bekannte Konzepte erlernt werden, muss im Fachunterricht das Konzept und eine zugehörige entweder aus der Alltagssprache anderweitig besetzte Vokabel oder ein zuvor unbekannter Begriff gleichzeitig erlernt werden.

Im Fachunterricht sieht Carlsen (1998) zudem die besondere Situation, dass eine asynchrone Kommunikationssituation vorliegt, in der die Lehrkraft gegenüber den SchülerInnen die Deutungshoheit hat, gleichzeitig die SchülerInnen aber zur selbstständigen Bedeutungskonstruktion motiviert werden sollen, somit also auch mögliche Fehlkonzepte offen kommunizieren und Fehler gegebenenfalls möglichst selbst erkennen und korrigieren sollen. Sprache nimmt nach Carlsen (1998) die Funktion von Bedeutungsvermittlung ein. Er versteht „making meaning“ entweder als „generating meaning“ in einer informativen oder diskursiven Funktion oder als „conveying meaning“ in einer autoritären Funktion. Die zweite Funktion von Sprache ist die Repräsentation von Wissen.

Nachdem die grundlegende Rolle von Sprache im Physikunterricht beschrieben wurde, soll im Folgenden die Sprache selbst und ihre unterschiedlichen Erscheinungsformen etwas genauer beleuchtet werden. Ein naheliegender Ansatz, der sich in vielen Beschreibungen des sprachlichen Geschehens im Physikunterricht findet, ist die Unterscheidung von Alltagssprache und Fachsprache. Diese Begriffe werden im Folgenden im Sinne der Varietätenlinguistik verwendet.³ Alltagssprache meint hierbei die Spra-

kationssituation und eine Stärkung der Bedeutung des einzelnen Sprachbenutzers / der einzelnen Sprachbenutzerin.

³ „Die Varietätenlinguistik erfasst als Teilgebiet der Soziolinguistik die Heterogenität einer Sprache und gliedert sie in unterschiedliche Varietäten. Sprache wird nicht mehr als in sich homogen betrachtet sondern als komplexe Menge unterschiedlicher Varietäten. Eine Varietät ist eine Differenzierung innerhalb einer Einzelsprache und ist ein in sich kohärentes Sprachsystem. Man kann von einer „Sprache in der Sprache“ sprechen. Die einzelnen Varietäten sind bestimmt durch verschiedene Ausprägungen und Kombinationen außersprachlicher Variationsparameter. Diese können in räumliche, soziale, situative und historische Parameter eingeteilt werden. Die außersprachlichen Parameter kovariieren jeweils mit sprachlichen Parametern (Sprachvariation) in den linguistischen Beschreibungsebenen der Phonetik (Lautbildungslehre), Phonologie (systemische Lautlehre, Frage nach der Bedeutung der Laute

che, die SchülerInnen aus ihrem Alltag kennen. Fachsprache ist die Varietät, in der Kommunikation im Fach stattfindet. Sie zeichnet sich gegenüber der Alltagssprache durch Exaktheit, Explizitheit und Anonymität aus, die sich in definierten Fachtermini, aber auch in bestimmten syntaktischen Merkmalen widerspiegeln (s. Kap. 4.3). Als dritte sprachliche Varietät spielt im Unterricht die Unterrichtssprache eine wichtige Rolle, der eine Vermittlerfunktion zwischen Alltags- und Fachsprache zukommt.

4.2.1. Zum Begriff der Alltagssprache

In der sprachwissenschaftlichen und fachdidaktischen Literatur gibt es eine Vielzahl von Begriffen, die zum Teil synonym zu verstehen sind. Eine ausführliche Diskussion der unterschiedlichen Begriffe aus sprachwissenschaftlicher Sicht findet sich bei M. Hoffmann (2007) oder auch bei Becker und Hundt (1998). Verschiedene Begriffe beziehen sich dabei auf unterschiedliche Perspektiven bei der Differenzierung und Beschreibung der verschiedenen Varietäten. Diese Perspektiven entscheiden maßgeblich, nach welchen Kriterien Sprache beschrieben wird. Gängige Perspektiven sind die *kommunikative Reichweite* oder die *kommunikative Funktion* einer Varietät.

Einige Bezeichnungen betonen besonders die *kommunikative Reichweite* einer überregionalen und somit nicht dialektal gefärbten Varietät. Diese Varietät vereint Gemeinsamkeiten unterschiedlicher Dialekte und wird von nahezu allen SprecherInnen einer übergeordneten (National-)Sprache verstanden. Gängig ist hier der Begriff *Gemeinsprache*, der sich meist auf einen statistischen Durchschnitt aller deutschen Varietäten bezieht. Synonym werden auch die Begriffe *Standardsprache*, *Muttersprache*, *Nationalsprache*, *Landessprache*, *Allgemeinsprache* verwendet. (Vgl. Becker und Hundt, 1998)

M. Hoffmann (2007), auf den sich in der fachdidaktischen Literatur auch Rincke und Markic (2018) beziehen, plädiert für eine Differenzierung der Begriffe *Umgangssprache* (regionalspezifisch) und *Alltagssprache* (überregional). Auch hier liegt somit ein Fokus auf der *kommunikativen Reichweite* der Varietäten.

Becker und Hundt (1998) verstehen den Begriff der *Alltagssprache* in Bezug auf seine *kommunikative Funktion* als die Varietät, die zur Anwendung kommt, wenn über alltägliche Dinge gesprochen wird. In diesem Sinne wird im Folgenden der Begriff *Alltagssprache* verwendet werden. Für die Betrachtung von Varietäten im Physikunterricht scheint diese Definition besonders gewinnbringend, da sie eine bessere Abgrenzung zur unter Abschnitt 4.2.2 beschriebenen Unterrichts- oder Bildungssprache

im konkreten Sprachsystem), Morphologie (Wortlehre, inkl. Wortbildungslehre), Syntax (Satzlehre), Lexik (Wortschatz) und Pragmatik (Lehre der konkreten Sprachnutzung im Kommunikationsakt).“ (Janßen, 2013, S. 8)

erlaubt, die ebenfalls eine große kommunikative Reichweite hat, jedoch einen anderen Kommunikationszweck verfolgt, der sich in spezifischen Merkmalen widerspiegelt.

4.2.2. Zu den Begriffen Unterrichtssprache und Bildungssprache

Leisen (2005a) führt für die Beschreibung von Sprache im Physikunterricht den Begriff Unterrichtssprache ein. Er identifiziert innerhalb der verbalen Sprache drei Sprachebenen: die Alltagssprache, die Unterrichtssprache und die Fachsprache. Diese drei Sprachebenen finden sich auch bei anderen AutorInnen, wie beispielsweise Prediger und Wessel (2011), die aber von Bildungssprache sprechen. Auch Rincke und Markic (2018) beziehen sich in ihren sprachwissenschaftlichen Überlegungen auf den Begriff der Bildungssprache, nutzen aber für die Beschreibung einer Interviewstudie mit LehrerInnen offenbar synonym den Begriff der Unterrichtssprache. Im Folgenden soll in dieser Arbeit der Begriff Unterrichtssprache verwendet werden.

Wie bereits bei der Diskussion zum Begriff der Alltagssprache in Abschnitt 4.2.1 erwähnt, unterscheiden sich sprachwissenschaftliche Beschreibungen verschiedener Varietäten in der Perspektive, unter der Sprache betrachtet wird. Eine mögliche Herangehensweise wäre eine *kontextorientierte Beschreibung*: Unterrichtssprache wäre alles sprachliche Handeln, das im Kontext des Physikunterrichts stattfindet. Eine solche Definition ist für diese Arbeit nicht zielführend, da sie alle im Physikunterricht auftretenden Sprachformen umfasst und nicht zwischen unterschiedlichen sprachlichen Varietäten innerhalb des Unterrichts differenziert.

Fokussiert man eine Differenzierung unterschiedlicher Sprachformen aufgrund ihres *pragmatischen Verwendungszwecks*, bietet sich der Begriff Unterrichtssprache an. Er beschreibt die Varietät näher, die für den Unterricht besonders geeignet ist. Für diese Arbeit wird der etwas spezifischere Verwendungskontext „Unterricht“ gegenüber dem etwas allgemeineren der „Bildung“ bevorzugt, der auch informelle Bildungsprozesse oder außerunterrichtliches Lernen, wie beispielsweise in Museen, miteinbeziehen könnte. Unterrichtssprache der Physik ist damit konkret eingeschränkt auf den Verwendungszweck des Physikunterrichtes. Dieser Verwendungszweck definiert bestimmte Anforderungen an die genutzte Varietät und rückt somit die Vermittlungsfunktion zwischen der Ausgangssprache der SchülerInnen (der Alltagssprache) und der Zielsprache, die die SchülerInnen erreichen sollen (der Fachsprache) in den Fokus.

Gegen eine Verwendung des Begriffes Bildungssprache spricht auch die politische und wertende Ladung des Begriffes, die im folgenden Zitat deutlich wird:

„Der Begriff der Bildungssprache hat seit den 2000er-Jahren erhöhte Aufmerksamkeit erfahren und nimmt in der Diskussion um gelingende Bil-

derungsteilhabe aller Schüler eine zentrale Rolle ein. Gogolin und Duarte (2016, S. 480 ff.) weisen darauf hin, dass mit Bildungssprache im Alltagsgebrauch oft eine höherwertige Varietät bezeichnet werde, nicht selten im expliziten Gegensatz zu Dialekten. Dem wissenschaftlichen Verständnis liegt jedoch ein grundsätzlich anderer Zugang zugrunde, der davon ausgeht, dass Menschen sich auf unterschiedliche Weise ausdrücken können und dass diese Ausdrucksweisen in unterschiedlichen Situationen unterschiedlich funktional sein können. Bildungssprache bezeichnet dann zunächst eine Sprache, die in Bildungskontexten gebraucht wird, um sich Wissen anzueignen, das der Alltag nicht ohne Weiteres zur Verfügung stellt. Die Beherrschung bildungssprachlicher Mittel ist häufig eine Voraussetzung für schulischen Erfolg; gleichzeitig ist es auch Aufgabe der Bildungsinstitutionen, den Zugang zu eben dieser Sprachvarietät zu schaffen.“ (Rincke und Markic, 2018, S. 39-40)

Aus diesen Gründen werden in dieser Arbeit die bereits von Leisen verwendeten Begriffe Alltagssprache – Unterrichtssprache – Fachsprache verwendet, die als funktionale Varietäten verstanden werden.

4.2.3. Zur Rolle von Alltagssprache und Fachsprache im Physikunterricht

Für den Physikunterricht und die physikdidaktische Forschung in besonderer Weise relevant sind die Überlegungen von Wagenschein, Muckenfuß und Leisen zur Rolle der Sprache im Physikunterricht, die viele weitere theoretische Überlegungen und Forschungsarbeiten motivierten, von denen einige in Abschnitt 4.4 dargestellt werden. Den Überlegungen von Wagenschein und Muckenfuß liegen unterschiedliche grundsätzliche Überzeugungen zugrunde, welche Rolle Fachsprache im Physikunterricht einnehmen sollte und wie diese Rolle beschrieben werden kann (s. Abb. 4.4). Wagenschein definiert Fachsprache als Ziel des Lernprozesses:

„Die Muttersprache ist die Sprache des Verstehens, die Fachsprache besiegt es, als Sprache des Verstandenen. Die Sprache der Physik ist also nicht einfach die Sprache des Physikunterrichts. Muttersprache ist nicht Abraum, sondern Fundament. Sie führt zur Fachsprache, sie beschränkt sich auf sie hin. Sie entläßt sie mit ihrem Segen, und nicht dar sie (wie so oft) ihr verstummend Platz machen.“ (Wagenschein, 1988, S. 137)

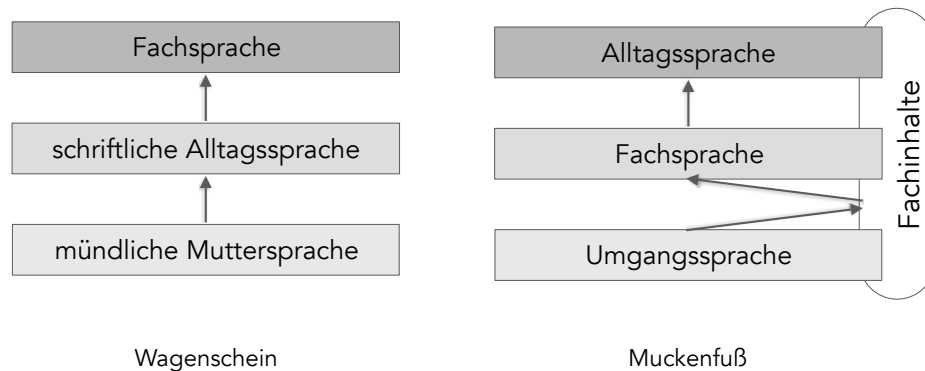


Abbildung 4.4.: Sprachebenen im Physikunterricht nach Wagenschein (1988) und Muckenfuß (1995)

Eine ähnliche Rolle der Alltagssprache als Sprache des Lernens sieht auch Merzyn (1998) in seinen „10 Thesen“ über Sprache im naturwissenschaftlichen Unterricht. Er betont, dass ein rein fachsprachlicher Unterricht verständnishemmend wirken kann. Fachsprache soll sich seiner Meinung aus der Alltagssprache heraus entwickeln.

Wie zum Beispiel Muckenfuß (1995) und auch Leisen (2005a) beschreiben, kann Lernen im konstruktivistischen Sinne nicht mit den exakten Begriffen der Fachsprache funktionieren, da fachsprachliche Termini immer ein fertiges gedankliches Abbild der vollständigen Bedeutung der Begriffe verlangen. Damit widerspricht die Eigenschaft der Exaktheit von Fachsprachen dem Lernprozess verstanden als Aushandeln von Begriffsinhalten. Muckenfuß (1995) betont aus diesem Grund die Bedeutung der Vagheit alltagssprachlicher Begriffe als Voraussetzung zwischenmenschlicher Kommunikation im Allgemeinen und der Kommunikation im Physikunterricht im Besonderen. Muckenfuß (1995) vertritt den Standpunkt, dass die Fachsprache eine notwendige Brücke zum Verstehen der Fachinhalte ist. Fachinhalte, die wirklich verstanden wurden, können und sollten aber am Ende des Lernprozesses in die Alltagssprache rückübersetzt werden. Nur so kann überprüft werden, ob Fachsprache nicht vielmehr als floskelhafte leere Hülle genutzt wird. Leisen (2005a) sieht ähnlich wie Muckenfuß (1995) eine parallele Entwicklung von Sprach- und Fachlernen:

„Sprache im Physikunterricht ist nicht vor der Physik da, ist ihr auch nicht nachgängig, sondern beides entwickelt sich gleichzeitig. Sprache im Unterricht ist wie ein Werkzeug, das man gebraucht, während man es noch schmiedet. Kommunizieren über Physik und Kommunizieren-Lernen in der Physik fallen zusammen.“ (Leisen, 2005a, S. 4)

Zusammenfassend sind sich alle Autoren einig, dass Sprach- und Fachlernen eng miteinander verknüpft sind und für ein sinnvolles Verwenden der Fachsprache ein gutes Verständnis physikalischer Konzepte notwendig ist. Mit Bezug auf Muckenfuß (1995) ist es ein besonderes Anliegen dieser Arbeit, einen Teil dazu beizutragen, die Verknüpfung der Fachsprache mit der Alltagssprache im Physikunterricht näher zu beleuchten. Diese Verknüpfung gibt die Möglichkeit, Konzepte (mit de Saussure gesprochen das signifié oder den Zeicheninhalt, s. auch Kap. 4.1) hinter fachsprachlichen Aussagen zu entschlüsseln.

4.3. Merkmale von Fachsprache, Alltagssprache und Unterrichtssprache

Dieser Arbeit liegt eine Unterscheidung sprachlicher Varietäten auf Grund ihres pragmatischen Verwendungszweckes zugrunde (s. Kap. 4.2). Die Sprachvarietäten, die im Kontext von Physik als Wissenschaft (Fachsprache der Physik), Physik als Unterrichtsfach (Unterrichtssprache der Physik) und im Alltag (Alltagssprache) verwendet werden, können deskriptiv durch einige Eigenschaften beschrieben werden, die diese Verwendungskontexte erfordern und die häufig auf in diesen Kontexten verwendete Sprache zutreffen. Diese Eigenschaften sind deskriptiver und nicht normativer Natur.

Eine Problematik in Bezug auf Varietäten im Unterricht ist das sich auftuende Spannungsfeld von (konzeptioneller) Mündlichkeit und Schriftlichkeit. Eigenschaften von Fachsprachen beziehen sich häufig auf konzeptionell schriftliche Textformen. Alltagssprache ist eher am mündlichen Sprachgebrauch orientiert. Diese Schriftlichkeit oder Mündlichkeit muss nicht zwingend gleichbedeutend mit ihrer tatsächlichen Erscheinungsform sein: schriftliche Texte können vorgetragen werden und einige Textformen orientieren sich stark an der mündlichen Sprache, wie Tagebucheinträge oder Briefe. Wie auch Rincke und Markic (2018, S. 33) betonen, orientiert sich die Beschreibung von Fachsprachen häufig an schriftlichen Texten, wie beispielsweise Lehrbuchtexten oder wissenschaftlichen Artikeln. Innerhalb eines Faches findet jedoch auch viel mündliche Kommunikation beispielsweise unter ExpertInnen statt, die sprachlich anders gestaltet ist als ein Lehrbuchtext. Hierzu finden sich jedoch kaum Beschreibungen. Deskriptiv lassen sich vor allem bezogen auf die Fachsprache einige Merkmale aufstellen, die diese Varietäten klassifizieren.

Im Unterricht treten die drei Varietäten Alltagssprache, Unterrichtssprache und Fachsprache oft nicht trennscharf nebeneinander auf. LehrerInnen wechseln mehr oder weniger bewusst zwischen ihnen, um Inhalte verständlich zu machen. Von SchülerIn-

nen wird in einigen Situationen explizit verlangt, etwas Beschriebenes noch einmal in Fachsprache wiederzugeben. Dies meint meist, dass sie für ihre Erläuterungen bereits erlernte Fachbegriffe verwenden sollen. Zudem ist Unterricht an und für sich ein buntes Sprachgemenge: SchülerInnen und LehrerInnen haben unterschiedliche soziale Hintergründe und Alterstrukturen und sprechen damit unterschiedliche Soziolekte und es treten mündliche und schriftliche Sprache nebeneinander auf (Unterrichtsgespräch, Tafelanschrieb, Lehrbuchtexte). „Die Sprache, die im Unterricht verwendet wird, wird also aus unterschiedlichen Richtungen mit je eigenen Hintergründen geformt. Unterricht ist auch dann innerlich mehrsprachig, wenn die Sprechergruppe nationalsprachlich homogen erscheint.“ (Rincke und Markic, 2018, S. 36)

Diese Ausführungen zeigen, dass eine präzise Trennung der Sprachvarietäten im Unterricht schwer ist und genauer sprachwissenschaftlicher Definitionen und Analysen bedürfte. Dies kann die hier folgende Beschreibung nicht leisten. Einige grundlegende Merkmale der Sprachebenen, insbesondere auf lexikalischer Ebene, können aber helfen, Sprachgeschehen im Unterricht besser zu verstehen und einzuordnen. Für eine nähere Beschreibung sei hier auf Rincke und Markic (2018) und Janßen (2013) verwiesen.

4.3.1. Merkmale von Fachsprache

Fachsprachen sind Varietäten, die aus besonderen Anforderungen an Sprache im wissenschaftlichen Verwendungskontext heraus entstanden und immer noch entstehen. Kommunikation in der Wissenschaft muss den Kriterien der Wissenschaftlichkeit genügen und damit insbesondere den Kommunikationsinhalt möglichst präzise und ökonomisch vermitteln. Dies resultiert in bestimmten Eigenschaften, die Fachsprachen erfüllen müssen, und Merkmalen, die zum Teil aus diesen Eigenschaften folgen und zu einem anderen Teil aus Kommunikationsgewohnheiten heraus entstanden sind.⁴ Fachsprachen weisen folgende Eigenschaften auf:

Exaktheit & Explizitheit Fachsprachen sollen präzise und genau Informationen vermitteln. Aussagen sollen möglichst wenig vage sein und damit den Interpretationsspielraum weitestgehend minimieren. Um dieses Merkmal zu gewährleisten, bedient sich Kommunikation im Fach eines streng definierten Fachwortschatzes. (Vgl. Baumann, 1998; Hahn, 1998)

Ökonomie Kommunikation in der Wissenschaft unterliegt in der Regel dem Bedürfnis

⁴Die im Folgenden dargestellten Eigenschaften und Merkmale von Fachsprachen sind in Janßen (2013) ausführlicher dargestellt.

nach Ökonomie. Wie in den meisten beruflichen Kontexten ist diese Ökonomie zum einen auf die Ressource Zeit bezogen: ExpertInnen sollen in der Lage sein, Informationen schnell auszutauschen (vgl. Fijas, 1998). Zum anderen kann sich Ökonomie aber auch auf die Ökonomie der kommunizierten Inhalte beziehen und ist damit eng mit der Eigenschaft der Exaktheit verknüpft. Um den Fokus auf die wirklich wesentlichen Informationen zu setzen und zu vermeiden, dass unwichtige Informationen in den Vordergrund rücken, soll nur genau das gesagt werden, was zum Beispiel für das Verständnis eines physikalischen Vorgangs relevant ist. Wenn der Ablauf eines Experimentes beschrieben wird, ist die Information, wie das Wetter an dem Tag war, nur dann relevant, wenn das Wetter einen Einfluss auf den Ausgang des Experimentes hat. Wenn dies nicht zutrifft, kann diese Information bei KommunikationsteilnehmerInnen zu Verwirrungen führen.

Auch die präzise determinierte Bedeutung der einzelnen Termini trägt dazu bei, dass bestimmte Inhalte nicht bei jedem Kommunikationsanlass neu explizit vermittelt werden müssen, vielmehr sind sie ökonomisch in den Termini verpackt. Es wird vorausgesetzt, dass KommunikationsteilnehmerInnen deren Bedeutungen kennen und sie mitdenken.

Anonymität Die Verwendung einer möglichst anonymen Sprache soll die Objektivität wissenschaftlicher Erkenntnisse zum Ausdruck bringen. Der Autor oder die Autorin der Äußerungen tritt hinter den Inhalt zurück und verliert an Bedeutung. Sprachlich drückt sich diese Eigenschaft in der Verwendung der dritten statt der ersten Person (z. B. „man“ statt „ich“) oder passiven anstelle von aktiven Formulierungen (statt „Ich starte die Messung.“ „Die Messung wird gestartet.“) aus. (Vgl. Oskaar, 1998)

Neben diesen Anforderungen und den aus ihnen resultierenden Eigenschaften gibt es einige zusätzliche Merkmale, die Fachsprachen charakterisieren. Syntaktisch gesehen zeichnen sich insbesondere schriftliche Fachtexte häufig durch größere mittlere Satzlängen und komplexere Satzstrukturen im Vergleich zu anderen Texten aus (vgl. Lothar Hoffmann, 1987, S. 204-206). Viele weitere syntaktische Merkmale wie Partizipialkonstruktionen, Genitiverweiterungen, Substantivgruppen, Nominalisierungen oder Attributformulierungen (vgl. Lothar Hoffmann, 1998, S. 418-422) gelten als verständniserschwerend, da sie die Satzstruktur häufig sehr komplex werden lassen. Daher haben diese in didaktischen Kontexten eine untergeordnete Bedeutung oder sollten zumindest in den unteren Klassenstufen nicht ohne expliziten Grund (beispielsweise

das Heranführen an wissenschaftliche Texte) verwendet werden.

Insbesondere auf Ebene der Textproduktion kann und sollte es nicht das Ziel von Physikunterricht sein, die SchülerInnen in die Lage zu versetzen, möglichst komplizierte Satzstrukturen zu bilden, wenn sie physikalische Prozesse beschreiben. Das Analysieren und damit hoffentlich auch verbesserte Verständnis solcher Sätze ist schwerpunktmäßig im Deutschunterricht anzusiedeln. SchülerInnen sollten aber in der Lage sein, einen physikalischen Vorgang unter Verwendung korrekter physikalischer Fachwörter verständlich zu beschreiben. Der rezeptive und produktive Umgang mit gängigen Fachwörtern und auch die Kenntnis durch strenge Definitionen festgelegter Termini gehören zu den Lernzielen des Fachunterrichtes, verankert in den Bildungsstandards für den mittleren Schulabschluss der Kultusministerkonferenz im Kompetenzbereich Kommunikation (Kultusministerkonferenz, 2005).

Jede fachliche Disziplin hat eine eigene Lexik, deren Begriffe zum Teil durch Entlehnungen aus der Alltagssprache (häufig aufgrund von Ähnlichkeiten z. B. die Begriffe Spannung oder Strom) oder Fremdsprachen (z. B. das Photon aus dem Griechischen) gebildet werden. In der Physik besonders häufig ist auch die Wortbildung auf Grundlage eines Namens, dies wird als Metonym bezeichnet (z. B. die Einheiten Watt, Ampere, Newton). Oftmals werden auch Worte neu gebildet, etwa durch Derivation eines Wortstammes mit Hilfe von Affixen (z. B. Mess-*ung*, *Supra*-leiter) oder durch Wortkompositionen (Wörter, die sich aus mindestens zwei anderen Wörtern neu zusammensetzen, z. B. Wirkungs-quantum). (Vgl. Fraas, 1998, S. 435)

Insbesondere bei Fachwörtern, die aus der Alltagssprache entlehnt sind, ist zu berücksichtigen, dass diese Entlehnungen zwar häufig aufgrund einer Ähnlichkeit des Fachkonzeptes mit der Alltagserscheinung geschah, die Bedeutung des Alltagsbegriffes allerdings auch zu falschen Übertragungen auf das physikalische Konzept und damit zu Fehlvorstellungen führen kann. Physikalische Begriffe weisen generell die Schwierigkeit auf, dass sie in der Regel Theoriegebilde bezeichnen, die nicht direkt erfahrbar sind und die beobachtbare Welt idealisieren und modellieren. (Vgl. Falkenburg, 1999, S. 89-90)

Im Schriftlichen zeichnet sich die physikalische Fachsprache außerdem durch die Verwendung sogenannter kunstsprachlicher Symbole aus, die insbesondere bei der mathematischen Beschreibung physikalischer Prozesse verwendet werden, aber auch in die mündliche Sprache einfließen. Hierzu zählen neben den aus der Mathematik stammenden Symbolen für mathematische Operationen (z. B. +, -, =) die Formelzeichen für physikalische Termini (z. B. R für den Widerstand, ϑ für die Temperatur, ω für die Winkelgeschwindigkeit) (vgl. Eisenreich, 1998b; Eisenreich, 1998a). Diese kunstsprachlichen Einflüsse finden sich häufig auch in der mündlichen Sprache wieder, etwa

wenn PhysikerInnen oder PhysiklehrerInnen Formelzeichen anstelle der Fachwörter nutzen oder Formeln aussprechen (vgl. auch Lothar Hoffmann, 1987, S. 68).

4.3.2. Merkmale von Alltagssprache

Im Gegensatz zur Fachsprache finden sich in der Alltagssprache viele Begriffe, die keine streng zugeordnete Bedeutung haben. Wenn wir das Beispiel des Baumes aus der Zeichentheorie de Saussures in Kapitel 4.1 aufgreifen, so sind im alltäglichen Sprachgebrauch die Konzepte, die wir von einem Baum haben, also die Zeicheninhalte, individuell sehr unterschiedlich. Jeder von uns hat in seinem Sprachlernprozess ein individuelles Modell aus unterschiedlichen Bäumen, die ihm begegnet sind, abstrahiert. Diese Modelle können dabei unterschiedliche Merkmale betonen oder vernachlässigen. Die meisten von uns werden an einen braunen Stamm und eine grüne Laubkrone denken. Für einige kann aber der Prototyp eines Baumes, den er beim Hören des Begriffes „Baum“ imaginiert, auch ein Nadelbaum oder ein Laubbaum mit einer bunten Herbstkrone sein. Menschen, die in der Nähe des Yosemite-Nationalparks in den USA leben, werden eventuell an einen großen Mammutbaum denken, während für einen Mitteleuropäer eine normale Baumgröße wesentlich kleiner ist.

Da Alltagssprache in der Regel konzeptionell mündlich oder zumindest nah an der mündlichen Sprache ist, sind die syntaktischen Strukturen häufig einfacher als in der Fachsprache. Es gibt weniger Nebensätze, die durchschnittlichen Satzlängen sind kürzer, aktive Formulierungen überwiegen gegenüber Passivformulierungen.

Alltagssprache ist die Sprachvarietät, die SchülerInnen aus ihrem Alltag kennen und beherrschen. Daher bereitet sie den SchülerInnen weniger Verständnisschwierigkeiten. Allerdings ist hier die eingangs beschriebene Problematik zu beachten, dass die SchülerInnen keineswegs alle die gleiche Sprachvarietät sprechen. Aufgrund von beispielsweise sozialen Unterschieden kann eine Aussage, die für die Lehrkraft alltagssprachlich ist, für einzelne SchülerInnen dennoch Verständnisschwierigkeiten bergen.

4.3.3. Merkmale der Unterrichtssprache

Leisen schreibt zur Unterrichtssprache: „Hinführende, erläuternde und erklärende Passagen in Fachtexten bemühen sich anschaulich und Beispiel gebunden um eine allmähliche, sanfte Hinführung zum Fachlichen.“ (Leisen, 2005a, S. 7) Er versteht Unterrichtssprache als eine „Werkstattsprache“, „methodische Zwischensprache“ oder „Noch-Nicht-Fachsprache“, die bereits physikalische Fachbegriffe verwendet, diese jedoch in einfache und gut verständliche Sätze verpackt. Im Gegensatz zur Fachsprache fehlt es der Unterrichtssprache laut Leisen an Präzision, sie sei handlungsbezogen

und auf konkrete Objekte statt auf allgemeingültige Aussagen bezogen. (Vgl. Leisen, 1998, S. 2)

Leisen bezieht sich mit dieser Beschreibung sehr auf den Lernprozess von der Alltagssprache zur Fachsprache. Die Unterrichtssprache kann in seinem (deskriptiven) Sinne als eine defizitäre Fachsprache oder als eine mit Fachwörtern angereicherte Alltagssprache verstanden werden. Laut der in Kapitel 4.2.2 gegebenen Definition ist die Wichtigkeit und Angemessenheit der Unterrichtssprache für den Unterricht und eine gelingende Kommunikation zwischen LehrerInnen und SchülerInnen an dieser Stelle zu betonen, da sie es im Gegensatz zur streng definierten Fachsprache ermöglicht, dass Begriffe in ihren Bedeutungen ausgehandelt und gemeinsam erarbeitet werden können. Muckenfuß (1995, S. 248) spricht in diesem Zusammenhang auch von einer Notwendigkeit der Vagheit alltagssprachlicher Begriffe für den Verstehensprozess.

Zentral soll an dieser Stelle aber die (deskriptive, nicht normative) Beschreibung der Unterrichtssprache als mit Fachwörtern versetzte Alltagssprache sein.

4.4. Fachdidaktische Erkenntnisse zur Sprache im Physikunterricht

Die Fachdidaktik der Physik beschäftigt sich seit mehreren Jahrzehnten mit dem Thema Sprache im Physikunterricht. Die empirischen Ergebnisse aus der fachdidaktischen Forschung lassen sich dabei grob in drei Bereiche einteilen:

- Das *Spannungsfeld von Alltags- und Fachsprache*, in dem sich Kommunikation im Physikunterricht bewegt: Übersichtsartikel sind beispielsweise Rincke und Markic (2018) und Härtig, Bernholt *et al.* (2015).
- Der *diskursive Verlauf* von Unterricht und der Entwicklung von *Argumentationsfähigkeiten* von SchülerInnen: Im internationalen Raum ist in diesem Bereich beispielsweise die Arbeit von Lemke (1990) richtungsweisend, der sprachliche Interaktionen im naturwissenschaftlichen Unterricht aufzeichnet und unter anderem Argumentationen und die Prozesse zur Generation von Bedeutungen („making meaning“) analysiert. Eine Übersicht des aktuellen Forschungsstandes findet sich in Aufschnaiter und Prechtel (2018).
- Der Umgang mit „sprachlicher Heterogenität“ im Zusammenhang mit SchülerInnen, die Deutsch nicht als Muttersprache, sondern meist als Zweitsprache sprechen: Das Interesse für diesen Forschungsschwerpunkt hat sich insbesondere in den letzten Jahren verstärkt.

Für diese Arbeit sind vor allem solche Arbeiten interessant, die sich in den ersten Schwerpunkt einordnen. Für die anderen beiden Schwerpunkte sei an dieser Stelle beispielhaft auf die genannte Literatur verwiesen. In allen Bereichen finden sich Arbeiten zum rezeptiven und produktiven Umgang mit schriftlichen Texten, sowie zur mündlichen Kommunikation im Unterricht.

4.4.1. Der Weg zur Fachsprache

Ähnlich wie sich in Abschnitt 4.2 unterschiedliche theoretische Überlegungen zum Verhältnis und der Rolle von Alltagssprache und Fachsprache im Physikunterricht zeigen, gibt es auch verschiedene empirische Ergebnisse mit jeweils unterschiedlichen Schwerpunktlagen. Grundsätzlich zeigt sich, dass viele Merkmale von Fachsprachen auf SchülerInnen verständniserschwerend wirken, was zu Schwierigkeiten im Lernen und Nutzen der Fachsprache im Unterricht führt (vgl. z. B. die Studien von Childs, Markic und Ryan (2015) und Markic, Broggy und Childs (2013), zit. nach Rincke und Markic (2018)). Diese Ergebnisse führen zu der Frage, wie der Weg zur Fachsprache im Physikunterricht sinnvoll gestaltet werden sollte. Im Folgenden sollen als zentrale Ansätze der „content-first-approach“ sowie die Rolle einer Interimssprache beschrieben werden.

Betonung der Alltagssprache und „content-first-approach“

Im internationalen Raum vertreten mehrere AutorInnen den „content first approach“, bei dem es darum geht, zunächst ein konzeptionelles Verständnis für physikalische Konzepte zu erlernen und erst im Anschluss daran die korrekte Fachsprache. Bezugnehmend auf Arons (1973) beschreiben beispielsweise Brown und Ryoo (2008) eine Studie mit 49 FünftklässlerInnen, bei der eine Gruppe, die zunächst in Alltagssprache und erst im Anschluss daran in Fachsprache unterrichtet wird, signifikant besser abschneidet als eine Kontrollgruppe, die ausschließlich in Fachsprache unterrichtet wird. Besonders bei Verständnisfragen, die in Alltagssprache gestellt werden, schneidet die Testgruppe erheblich besser ab, aber auch ihre fachsprachlichen Kompetenzen sind besser als die der Kontrollgruppe.

Diese Ergebnisse erscheinen insofern wenig überraschend, als dass Fachsprache durch ihre besonderen Strukturen und den SchülerInnen unbekannte Fachwörter immer schwierigkeiterzeugend ist. Daher scheint es immer sinnvoll, neue Inhalte in an die SchülerInnen angepasster, für sie verständlicher Sprache zu vermitteln.

Im deutschsprachigen Raum sind insbesondere Apolin und Merzyn als Lanzenbrecher für eine möglichst alltagsnahe, verständliche Unterrichtssprache zu nennen.

Merzyn (1987) fasst mehrere Untersuchungen aus den 1980er Jahren zusammen und plädiert vor allem dafür, die tatsächliche Notwendigkeit verwendeter Fachbegriffe zu reflektieren. In einer naturwissenschaftlichen Unterrichtsstunde würden etwa neun neue Fachbegriffe verwendet, in einem Schulbuchtext sei etwa jedes sechste Wort ein Fachbegriff.

Apolin (2002) untersucht in seiner Dissertation Texte in Lehrbüchern und führt eine Interventionsstudie mit 54 SchülerInnen der 6. bis 8. Klassenstufe durch. Hierfür lässt er die Testgruppe mit nach Kriterien des Hamburger Verständlichkeitsmodells verbesserten Texten und eine Kontrollgruppe mit den normalen Lehrbuchtexten arbeiten und erhebt im Anschluss das Verständnis der SchülerInnen. Er stellt fest, dass die Testgruppe signifikant besser abschneidet. Er fasst zusammen:

„Man muss den SchülerInnen also ‚sprachlich entgegenkommen‘. Oder anders formuliert: Um den SchülerInnen möglichst viel Physik zu vermitteln, müssen LehrerInnen ‚sprachlich abwärtskompatibel‘ sein, sie müssen also lernen, die Sprache der SchülerInnen zu sprechen.“ (Apolin, 2004, S. 18)

Von der Alltagssprache zur Fachsprache – ein diskontinuierlicher Prozess

Das Entstehen einer Interimssprache, wie sie ähnlich auch aus dem Fremdsprachenunterricht bekannt ist, beobachtet Rincke (2007) in einer Studie über den Fachspracherwerb beim Thema Kraft. Das Erlernen der Fachsprache verläuft keineswegs linear, sondern SchülerInnen kehren auch immer wieder zu fachsprachlich falschen Aussagen zurück: „Für die Schülerinnen und Schüler stellt sich der Übergang von der Alltags- in die Fachsprache vermutlich eher als Bruch dar denn als schrittweiser Übergang, zumindest den Kraftbegriff betreffend. [...] Ihre Sprache ist eher einem Taumeln zwischen zwei Welten vergleichbar, für das der Unterricht vermutlich lange Zeit und viel Raum geben muss, bis sich diese Welten auch im Denken der Schülerinnen und Schüler scheiden und sie einer bewussten Wahl der Sprache und des gedanklichen Konzepts fähig werden.“ (Rincke, 2010, S. 60) Rincke führt dies darauf zurück, dass die SchülerInnen beim Erlernen einer Sprache nur entweder auf fachliche oder auf sprachliche Korrektheit achten können. Insbesondere, wenn SchülerInnen ein hohes kommunikatives Interesse haben, scheinen sie fachsprachlich Fehler zu machen. Daher plädiert er dafür, bewusst Phasen im Unterricht einzuplanen, in denen die sprachliche Korrektheit einem Erzählen weicht. Außerdem schlägt er einen Metadiskurs über sprachliche Aspekte als „Steigbügel“ für ein verbessertes fachliches und fachsprachliches Lernen vor. (Vgl. Rincke, 2010)

Auf die Bedeutung eines Metadiskurses soll auch in Abschnitt 4.4.3 noch einmal näher eingegangen werden.

4.4.2. Kompetenzmodelle zur physikspezifischen Kommunikationsfähigkeit

Spätestens seit Einführung der Bildungsstandards der Kultusministerkonferenz für den Mittleren Schulabschluss (Kultusministerkonferenz, 2005) ist der Kompetenzbegriff in der physikdidaktischen Forschung sehr präsent und gewinnt in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung. Im Zentrum stehen neben der Beschreibung und Modellierung der Kompetenzen, die bei SchülerInnen durch den Physikunterricht erreicht werden sollen, und der Entwicklung von Testinstrumenten auch die Kompetenzen der Lehrkräfte. Letzteres basiert insbesondere auf dem PCK-Modell von Shulman (1987): Wissen und Kompetenzen von LehrerInnen werden in den Bereichen des CK (content knowledge), pedagogical content knowledge (PCK) und des pedagogical knowledge (PK) analysiert. Aus diesen Strömungen entwickelten sich auch Ansätze zur Beschreibung der Kompetenzen von SchülerInnen und LehrerInnen im Bereich der Kommunikation. Diese sollen im Folgenden beschrieben werden.

Kulgemeyer und Schecker (2009) entwickeln ein Modell zur Beschreibung der physikspezifischen Kommunikationskompetenz, erstellen darauf aufbauend ein Testinstrument und leiten Kompetenzstufen ab (Kulgemeyer und Schecker, 2012). In dem von ihnen entwickelten Kompetenzmodell legen sie die normativen Regelstandards der Bildungsstandards der Kultusministerkonferenz zugrunde (Kultusministerkonferenz, 2005) und entwickeln hieraus ein deskriptives Modell, um genauer zu fassen, was physikspezifische Kommunikationskompetenz von SchülerInnen erfordert. Sie definieren: „Physikalische Kommunikationskompetenz umfasst Fähigkeiten und Fertigkeiten, die notwendig sind, um physikalische Sachverhalte zu erklären.“ (Kulgemeyer und Schecker, 2009, S. 137) Rezeptive Informationsentnahme klammern die Autoren bewusst aus. Als kommunikationstheoretische Grundlage dient das Kommunikationsmodell von Rusch (1999), der das klassische Sender-Empfänger-Modell erweitert und die Bedeutung des Empfängers im Kommunikationsprozess stärkt. Der Empfänger erhält die Information des Senders nicht mehr direkt über einen Kanal, vielmehr muss er die Information selbst konstruieren. Diese neue Konstruktion der gesendeten Information ist abhängig von der Attraktivität des Kommunikationsangebots, den sozialen Erfahrungen und den bestehenden Wissensstrukturen. Die Abbildung 4.5 stellt das von Kulgemeyer (2010) entwickelte Kommunikationsmodell dar.

In dieser Arbeit wird nicht der vollständige Kommunikationsprozess im Unterricht

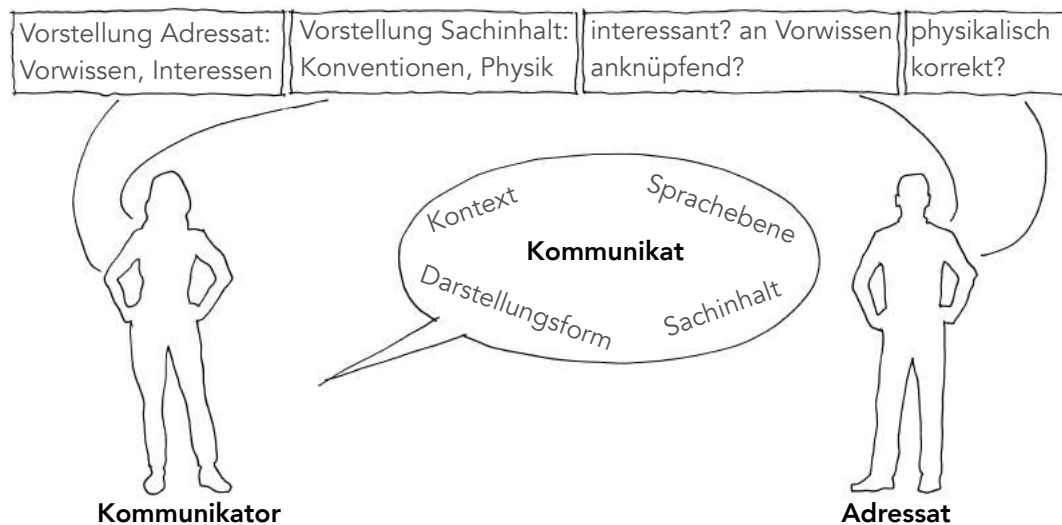


Abbildung 4.5.: Konstruktivistisches Modell physikalischer Kommunikation, leicht adaptierte Darstellung nach Kulgemeyer (2010) und Kulgemeyer und Schecker (2012)

betrachtet. Vielmehr liegt der Fokus auf der Seite der Lehrkraft als Kommunikator:

„Der *Kommunikator* nimmt vor dem Hintergrund seines Vorwissens und seiner Einstellungen einen Sachinhalt wahr. Dieser Sachinhalt soll vor dem Hintergrund domänenspezifischer Kompetenz speziell physikalischer Natur sein. Dass er diesen Sachinhalt vor dem Hintergrund seiner Vorerfahrungen und Einstellungen wahrnimmt, heißt jedoch, dass er schon eine Interpretation des Sachverhalts vornimmt und eine Vorstellung von der Beschaffenheit des Sachverhalts hat. Ebenso hat er eine Vorstellung von den Bedürfnissen des Adressaten seiner Kommunikationsbemühungen.“
(Kulgemeyer und Schecker, 2009, S. 137)

Für diese Arbeit enthält die Beschreibung zwei interessante Punkte: Der Kommunikationsinhalt wird vom Kommunikator interpretiert. Was eine Lehrkraft also über physikalische Inhalte sagt, ist stark abhängig von seinem oder ihrem individuellen Vorwissen. Neben dem Kommunikationsinhalt (in unserem Fall der gesprochenen Sprache des Lehrers oder der Lehrerin) sind auch seine oder ihre Vorstellungen der Bedürfnisse der SchülerInnen relevant. Beschäftigen wir uns mit der Sprache von LehrerInnen im Physikunterricht als Informationsangebot an die SchülerInnen, sollten wir also diese beiden Punkte mitberücksichtigen. Über den Kommunikationsinhalt, das Kommunikat genannt, schreiben Kulgemeyer und Schecker (2009) weiter:

„Der Kommunikator kann sich in der Regel nur über einen speziellen Aspekt des Sachinhalts mitteilen. Nach konstruktivistischer Vorstellung gelingt es ihm nun nicht, diesen Aspekt (wie es beispielsweise bei Shannons Sender-Empfänger-Modell möglich wäre) direkt zu transportieren. Er ist lediglich in der Lage ein *Kommunikat* zu schaffen, das aus der Verbindung des aspekthaften Sachinhalts mit einer Darstellungsform (z. B. einem bestimmten Diagramm) oder einem Medium besteht.“ (Kulgemeyer und Schecker, 2009, S. 137-138)

Es wird also niemals ein vollständiger physikalischer Sachverhalt kommuniziert, vielmehr legt die Lehrkraft durch seine oder ihre Interpretation Schwerpunkte, andere Aspekte werden vernachlässigt. Dies liegt in der Natur jeder Kommunikation und geschieht bereits auf Seite des Kommunikators. Unabhängig davon nimmt der Adressat ebenfalls nur bestimmte Aspekte in Abhängigkeit der Attraktivität des Kommunikationsangebots, seines oder ihres individuellen Vorwissens und auch des Kommunikationskontextes wahr. Als kompetent gilt ein Kommunikator dann, wenn er Kommunikation adressatengerecht und sachgerecht gestalten kann. Adressatengerecht wird Kommunikation dabei durch die Wahl eines an Vorwissen und Interesse des Adressaten angepassten *Kontextes*, die Wahl eines für den Adressaten überhaupt entschlüsselbaren sprachlichen *Codes* (bspw. Alltagssprache, Fachsprache), die Wahl einer für den Adressaten verständlichen *Darstellungsform* und die angemessene Auswahl zu kommunizierender *Aspekte des Sachinhalts* unter Berücksichtigung von Vorwissen und Interesse des Adressaten. (Vgl. Kulgemeyer und Schecker, 2009, S. 139)

Eine sachgerechte Kommunikation muss zudem „Sachinhalte fachlich adäquat, korrekt und konsistent sowie unter Berücksichtigung von fachlichen Konventionen in ein *Kommunikat*“ überführen (Kulgemeyer und Schecker, 2009, S. 140). Auch dies berücksichtigt die Wahl eines richtigen *Codes*, einer angemessenen *Darstellungsform* und die fachlich angemessene *Auswahl von Sachaspekten*. Kommunikationskompetenz drückt sich somit in der angemessenen Wahl und Verwendung von sprachlichen *Codes*, *Darstellungsformen*, *Sachaspekten* und *Kontexten* aus.

Während sich die Arbeiten von Kulgemeyer und Schecker auf den Kommunikationsprozess als Ganzes beziehen, beschäftigen sich Höttecke, Ehmke *et al.* (2017) mit der Entwicklung eines Testinstrumentes zur Erfassung der physikalischen Fachsprachenzkompetenz von SchülerInnen.⁵ In der Pilotstudie des Testinstrumentes mit 99

⁵Das hier entwickelte Testinstrument basiert auf sogenannten C-Tests aus der Fremdsprachendidaktik, bei denen die Testpersonen unvollständige Sätze mit Wortfragmenten verstehen müssen, wobei sie laut Höttecke, Ehmke *et al.* (2017) für die Rekonstruktionsleistung auf komplexe sprachliche Fertigkeiten angewiesen sind. „Dazu zählen die Beherrschung kognitiver und metakognitiver Strategien

SchülerInnen der siebten Jahrgangsstufe zeigt sich eine Evidenz für fachsprachliche Fähigkeit als eine eigenständige Teilfähigkeit. Außerdem zeigte sich eine hohe Korrelation zwischen fachsprachlicher Fähigkeit und der Zeugnisnote in Physik sowie in Deutsch. Dies spricht für eine große Bedeutsamkeit fachsprachlicher Fähigkeiten für den Unterrichtserfolg von SchülerInnen in Physik. (Höttecke, Ehmke *et al.*, 2017, S. 67)

In Bezug auf LehrerInnen zeigen Ergebnisse einer Interviewstudie von Markic (2017) zum pedagogical content knowledge (PCK) bezogen auf Sprache, dass die befragten LehrerInnen Fachbegriffe als kontextuell an den Inhalt des Faches wahrnehmen. Sie sind sich dessen bewusst, dass Fachsprache sich durch bestimmte Charakteristika auszeichnet (z. B. Wortstämme aus der griechischen Sprache und Latein; unterschiedliche Bedeutung im fachlichen und alltäglichen Verwendungskontext) und sich damit von der Alltagssprache unterscheidet. Außerdem äußern viele der befragten LehrerInnen das Konzept, dass eine Fachsprache mit einer Fremdsprache gleichzusetzen sei. Viele weitere Aussagen beziehen sich auf Fachwörter: Diese könnten auch in anderen Kontexten gebraucht werden und Fachwörter besäßen eine Hierarchie und Wichtigkeit, die darüber entscheide, ob sie im Unterricht vorkämen. (Rincke und Markic, 2018, S. 43-44) Kritisch merken Rincke und Markic (2018, S. 44) an, dass das Wissen über geeignete Lehrmethoden und spezifische Eigenschaften der Fachsprache sehr gering und in vielen Fällen intuitiv sei. Das explizite Thematisieren der Fachsprache im Unterricht, das von vielen Fachdidaktikern gefordert wird (vgl. auch Abschnitt 4.4.3), ist den Befragten wenig wichtig. Auch kritisieren die AutorInnen, dass die Befragten das Lernen einer Fachsprache häufig mit dem Lernen einer Fremdsprache gleichsetzen und oftmals auf reines Vokabellernen reduzieren. Auch dies spricht gegen die fachdidaktischen Erkenntnisse, dass das Erlernen von Fachbegriffen mehr ein Konzeptlernen als ein Vokabellernen ist. Die Studie scheint trotz der geringen Anzahl befragter LehrerInnen ein recht homogenes Bild zu zeigen: LehrerInnen ist im Ansatz bewusst, dass Fachsprache im naturwissenschaftlichen Unterricht für SchülerInnen eine Schwierigkeit darstellt. Darüber hinaus scheinen den befragten LehrerInnen aber kaum explizite Strategien bekannt zu sein, mit dieser Schwierigkeit umzugehen.

Der dargestellte Forschungsstand zeigt somit ein Desiderat zum einen in Bezug auf die konkrete Verwendung von Sprache im Physikunterricht. Aber auch ein näherer Blick auf das Metawissen von LehrerInnen über die Sprache im Physikunterricht und

und Wissensbestände sprachlicher, strategischer und textueller Art sowie Weltwissen. Weiterhin wird textcharakteristisches Wissen über die Textkohärenz (die Inhalts- bzw. Tiefenstruktur des Textes betreffend) und die Textkohäsion (die syntaktische bzw. Oberflächenstruktur eines Textes betreffend) benötigt.“ (Höttecke, Ehmke *et al.*, 2017, S. 58) Ein Beispielitem ist der folgende zu ergänzende Satz: „In einem _____inienbild werden viele magnetische Feldlinien _____stellt.“ (Höttecke, Ehmke *et al.*, 2017, S. 61)

eventuelle didaktische Strategien scheint somit vielversprechend.

4.4.3. Implikationen für den Unterricht

Aus den im letzten Abschnitt präsentierten fachdidaktischen Erkenntnissen ergeben sich verschiedene methodische und inhaltliche Implikationen für den Unterricht, die SchülerInnen auf dem Weg zum kompetenten Umgang mit Fachsprachen unterstützen sollen. Eine Darstellung bekannter Strategien ist für diese Arbeit relevant, um die beobachteten Sprachhandlungen der LehrerInnen im empirischen Teil dieser Arbeit mit fachdidaktischen Überlegungen für die Unterrichtspraxis abzugleichen. Aus den im Folgenden dargestellten Forderungen lassen sich Schwerpunkte für die Beschreibung und Analyse der Sprachhandlungen ableiten. So fordern viele AutorInnen vor allem, Unterschiede zwischen Alltags- und Fachsprache explizit zu machen und im Unterricht einen Metadiskurs über Fachsprache anzuregen. Des Weiteren gibt es methodische Hinweise, wie das Nutzen und Anregen von Darstellungswechseln, zu denen auch die „Übersetzung“ algebraischer Ausdruck in verbalsprachliche Aussagen gehört. Im Folgenden sollen diese zwei Ansätze kurz vorgestellt werden.

Metadiskurs und Fachsprache explizit unterrichten

Brown und Ryoo (2008) und Rincke (2007) untersuchen das fachliche Verständnis von SchülerInnen in Abhängigkeit von verwendeten Sprachformen. Beide Studien kommen zu sehr ähnlichen Ergebnissen: SchülerInnen, die in verständlicher Alltagssprache unterrichtet werden, erzielen bessere Lernergebnisse. Die Autoren leiten daraus ab, dass SchülerInnen mit dem gleichzeitigen Lernen von Fachinhalten und Fachsprache überfordert sind. Beide ziehen daraus die Konsequenz, dass Fachsprache explizit im Unterricht thematisiert werden muss. Dies deckt sich auch mit den in Kapitel 3.1 dargestellten theoretischen Grundlagen zu Darstellungsformen im Allgemeinen. Rincke (2010) betont außerdem, dass ein explizites Lernen über Fachsprache dabei auch immer das inhaltliche fachliche Lernen verstärkt:

„Wenn Schülerinnen und Schüler sich im Rahmen des Metadiskurses mit gegebenen fachsprachlichen Beschreibungen auseinandersetzen und sowohl Elemente der Form wie des Inhalts wahrnehmen, darf davon ausgegangen werden, dass dies die erfolgreiche Auseinandersetzung mit dem fachlichen Konzept begünstigt. Aufgaben, die die Auseinandersetzung mit der Sprache anregen, bieten sich daher als eine Steighilfe an, um die mit

dem Wechsel in die fachsprachliche Ebene verbundenen Hürden zu überwinden.“ (Rincke, 2010, S. 13)

Ähnlich fordert auch Lemke, auf den sich Rincke (2010, S. 13) bezieht, bereits 1990, dass LehrerInnen Fachsprache explizit thematisieren sollten:

„Teachers should model scientific language by explaining to students how they themselves are combining terms together in sentences. They should stop to point out special idioms and phrases. [...] In present practice teachers tend to leave much of the semantics and grammar of scientific language completely implicit. Students are expected to figure all this out for themselves. That is too much to expect of students who have to deal with topics and thematic content that are so distant from common experience.“ (Lemke, 1990, S. 170)

Diese Forderungen decken sich mit ähnlichen Erkenntnissen aus der Nature-of-Science-Forschung, die ebenfalls zu der wesentlichen Einsicht kommt, dass Metadiskurse über die Natur der Naturwissenschaft explizit geführt werden müssen, damit SchülerInnen über die Natur des Faches reflektieren und Erkenntnisse in diesem Bereich erlangen. (Vgl. z. B. die Übersichtsartikel Lederman, 2007; Heering und Kremer, 2018; Höttecke, 2001; Höttecke und Hopf, 2018) ⁶

Als konkrete Möglichkeit, diesen Metadiskurs zu gestalten, beschreibt Rincke (2010) neben dem kontrastierendem Vergleich von Fachsprache und Alltagssprache auch das aus dem Fremdsprachenunterricht entlehnte Lernen in Kollokationen. Damit ist gemeint, dass Fachbegriffe nicht für sich stehend, sondern immer im Kontext von umgebenden Worten verstanden werden müssen, die häufig darüber entscheiden, ob der Begriff fachsprachlich richtig verwendet wird. Rincke beschreibt dies am Beispiel Kraft. Das Wort Kraft fungiert im Zusammenhang mit dem Verb *ausüben* und der Präposition *auf* als Fachbegriff. In anderen Kontexten, beispielsweise in der Formulierung „Der hat aber Kraft!“ ist der Begriff alltagssprachlich als eine Körpereigenschaft eines Menschen zu verstehen. Außerdem schlägt Rincke vor, Fachbegriffe nicht über lexikalische Definitionen einzuführen, sondern ihre Bedeutung im Kontext von Sätzen und

⁶Die meisten Übersichtsartikel verweisen als Beleg für die Notwendigkeit, Nature of Science explizit zu unterrichten, auf eine Studie von Khishfe und Abd-El-Khalick (2002). Diese untersuchen mit einer relativ kleinen Stichprobe (n=62) im Rahmen von forschendem Unterricht die Veränderungen im Verständnis von Nature of Science. Sie vergleichen eine Gruppe, die nur implizit durch die im Unterricht verwendete naturwissenschaftliche Methodik, wie beispielsweise das Experimentieren, etwas über Nature of Science lernen kann, mit einer Gruppe, die explizit mit der Thematik konfrontiert wird. Im Ergebnis zeigt die Gruppe, die explizit unterrichtet wurde, einen deutlichen Erkenntniszuwachs, während die implizite Gruppe keine Veränderungen in ihrem Verständnis von Nature of Science zeigt.

Beschreibungen zu erarbeiten. (Vgl. Rincke, 2010, S. 5-7) Diese Forderung ist eng verknüpft mit dem Verständnis von Muckenfuß (1995), der in Bezug auf präzise definierte Fachbegriffe fordert:

„Begriffe, die in dem Sinne ‚präzise‘ sind, daß ihnen nur eine scharf umrissene Bedeutung zugeordnet werden darf, sind für den Lernprozeß von geringem Wert, weil sie subjektiv keine neuen Inhalte konstituieren, sondern nur bereits Bekanntes ordnen oder aber nicht verstanden werden.“
(Muckenfuß, 1995, S. 250)

Eine weitere Möglichkeit beschreiben Härtig und Stosik (2015), die in einer Studie den positiven Einfluss von Wortschatzarbeit auf die Fachsprache der SchülerInnen zeigen. Beispiele solcher Wortschatzarbeit sind Zuordnungsübungen von Termini und ihrer Beschreibungen oder auch der Vergleich verschiedener Aussagen unter dem Aspekt der fachlichen Richtigkeit.

Wechsel der Darstellungsformen

Viele AutorInnen schlagen als konkrete Methode für die Förderung inhaltlichen Verständnisses, aber auch fachsprachlicher Fähigkeiten die bewusste Verknüpfung und den aktiven Wechsel zwischen unterschiedlichen Darstellungsformen vor. Ähnlich wie die Forderung nach einem expliziten Unterricht *über* Fachsprache, ist auch diese Forderung deckungsgleich mit grundlegenden Überlegungen zu Darstellungsformen, die in Kapitel 3.1 dargestellt wurden. Für die Förderung der Fachsprache schlagen Bolte und Pastille (2010) kleine Methoden für den Unterricht, „Werkstücke“ genannt, vor, die in besonderem Maße sprachaktivierend wirken sollen und sich damit positiv auf Kommunikationskompetenz der SchülerInnen im naturwissenschaftlichen Unterricht auswirken sollen. Sie entwickeln ein Rahmenmodell für sprachaktivierende Handlungen, das „Aktivierungsrechteck“, an deren Ecken (1) Phänomen, Experiment, Bild, Filmsequenz ... (2) diskontinuierlicher Text, Stichpunktliste, Skizze ... (3) kontinuierlicher Text (4) komplexe Graphik stehen und von den SchülerInnen jeweils ineinander überführt werden sollen. (Vgl. Bolte und Pastille, 2010, S. 40-41)

Auch in der Mathematikdidaktik gibt es methodische Überlegungen zur Förderung der Sprachkompetenz. Unter Berücksichtigung der Mehrsprachigkeit im Unterricht fordern Prediger und Wessel (2011) eine Vernetzung verschiedener Darstellungsebenen. Sie sehen den Umgang mit unterschiedlichen Darstellungen zum einen als Lernziel des Mathematikunterrichtes, zum anderen als Lernhilfe und berufen sich für diese

verständnisfördernde Eigenschaft der Verwendung unterschiedlicher Darstellungen auf Studien aus der Psychologie sowie der Mathematikdidaktik.

Aus theoretischen Überlegungen heraus fordert auch Leisen eine stärkere Vernetzung unterschiedlicher Darstellungsformen (Leisen, 2005b; Leisen, 1998; Leisen, 2005a) (s. auch Kap. 5.1). Leisen (1998) unterscheidet eine gegenständliche, bildliche, sprachliche, symbolische und mathematische Ebene. In späteren Veröffentlichungen unterscheidet er die Sprachebene zusätzlich in Alltagssprache, Unterrichtssprache und Fachsprache. (Vgl. z. B. Leisen, 2005a) Leisen ordnet diese Darstellungsformen nach steigender Abstraktion und begründet einen Wechseln zwischen diesen Ebenen mit einer Förderung der Fachkompetenz (Inhalte werden durch Übertragung in eine andere Darstellungsform in neue fachliche Zusammenhänge gebracht), der Sprachkompetenz (da durch die Überführung in eine andere Sprachform diese Sprachform selbst eingeübt wird) und der fachlichen Kommunikationskompetenz (insbesondere durch das adressatengerechte Auswählen von Darstellungsformen). Leisen betont: „Der Wechsel von Symbolisierungsformen fördert und stimuliert die kognitive Tätigkeit in besonderem Maße.“ (Leisen, 1998, S. 10). Dies begründet er vor allem in der Erfahrung, weniger in konkreten empirischen Erkenntnissen. Insbesondere in Verbindung mit mathematischen Darstellungsformen betont Leisen die Wichtigkeit der Sprache:

„Wenn man Physik ausschließlich in mathematischer Symbolik (Formeln) und graphisch – gewissermaßen in einer überdimensionalen Formelsammlung - darstellt, so können Experten mit dieser ‚sprachlosen‘ Darstellungsform etwas anfangen nicht jedoch diejenigen, die noch auf dem Weg zur Physik sind. Physik ohne Sprache ist bestenfalls etwas für den sozialisierten Experten.“ (Leisen, 2005a, S. 4)

SchülerInnen, die im Physikunterricht die Rolle von Novizen einnehmen, benötigen also besonders beim Erlernen der abstrakten mathematischen Darstellungsformen Unterstützung durch ein paralleles Verwenden natürlich-sprachlicher Darstellungen. Einen solchen Ansatz des Darstellungswechsels verfolgt auch diese Arbeit, indem sie die Verknüpfung von Formeln mit (unterschiedlichen) verbal-sprachlichen Darstellungsformen näher betrachtet.

5. Verknüpfung von Formeln und Sprache: Ein Ebenenmodell der Versprachlichung von Formeln

Als Grundlage der Beschreibung und Analyse vom sprachlichen Umgang mit Formeln wurde ein auf sprachwissenschaftlichen und fachdidaktischen Überlegungen basierendes Ebenenmodell der Versprachlichung von Formeln entwickelt. Dieses Modell basiert auf der grundlegenden Überlegung, dass unterschiedliche Darstellungsformen im Physikunterricht, zu denen Formeln und verbale Sprache gezählt werden können, unterschiedliche Anforderungen an SchülerInnen stellen. Zugang zu dieser Unterschiedlichkeit der Darstellungsformen und ihren spezifischen Eigenschaften bieten unter anderen Modelle, die Darstellungsformen klassifizieren. Einige für diese Arbeit relevante Klassifizierungen werden im ersten Teil des Kapitels, 5.1, vorgestellt. Das Ebenenmodell beschreibt die Verknüpfung der algebraischen Darstellungsform „Formel“ mit verschiedenen verbal-sprachlichen Darstellungen. Die grundsätzliche Idee einer Schichtung verschiedener fachsprachlicher Ausdrücke ist aus der Sprachwissenschaft entlehnt. Diese Grundlage ist in 5.2 dargestellt. Im Anschluss an diese theoretischen Fundierungen wird die Entwicklung des Ebenenmodells mit induktiven Anpassungen in Kapitel 5.3 beschrieben und anschließend das finale Modell, das für diese Arbeit genutzt wird, in Kapitel 5.4 dargestellt.

5.1. Fachdidaktische Grundlagen des Ebenenmodells: Klassifikation von Darstellungen

In der fachdidaktischen Forschung gibt es mehrere Ansätze, Darstellungsformen des Physikunterrichtes zu klassifizieren. Allgemein muss unterschieden werden zwischen internen Repräsentationen (mentale Modelle von Wirklichkeitsausschnitten) und externen Repräsentationen (Darstellungen von Wirklichkeitsausschnitten, die in der Regel in einen Kommunikationszusammenhang eingebettet sind, also von einer Person mit einer kommunikativen Zielstellung für eine andere Person erstellt werden). Die Er-

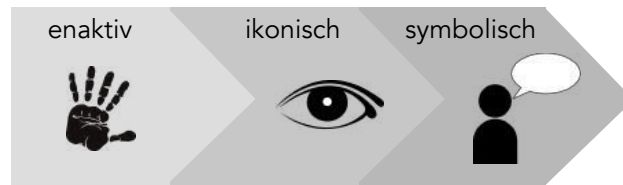


Abbildung 5.1.: Klassifikation von Darstellungen nach Bruner, Darstellung adaptiert aus Geyer und Kuske-Janßen (2019, S. 76)

stellung und auch Rezeption externer Repräsentationen wird dann wiederum von den internen Repräsentationen der KommunikationspartnerInnen maßgeblich beeinflusst.

¹

Einen grundlegenden, lernpsychologischen Zugang zu Darstellungsformen und ihren Unterschieden bietet Bruner (1974). Er beschreibt ontogenetische Entwicklungsphasen eines Menschen, in denen der Mensch in seinen mentalen Repräsentationen zu immer abstrakteren Formen fähig ist. Diese Phasen sind zeitlich nicht streng voneinander abgetrennt, eher beschreiben sie Phasen der Betonung einer Fähigkeit innerhalb der Entwicklung. Er beschreibt die Entwicklung drei paralleler Systeme zur Weiterverarbeitung und zur Darstellung von Informationen, die unterschiedliche kognitive Prozesse nutzen: 1. Manipulation und Aktion, 2. Organisation des Erkenntnisapparates und der Bildersprache und 3. einen Apparat von Symbolen (vgl. Bruner, 1974, S. 33). Diese Phasen spiegeln sich auch in Repräsentationen eines Faches wider:

„Jeder Wissensbereich (oder jede Problemstellung innerhalb eines solchen Wissensbereichs) kann auf dreifache Art dargeboten werden: durch eine Zahl von Handlungen, die geeignet sind, ein bestimmtes Ziel zu erreichen (enaktive Repräsentation), durch eine Reihe zusammenfassender Bilder oder Graphiken, die eine bestimmte Konzeption versinnbildlichen, ohne sie ganz zu definieren (ikonische Repräsentation), und durch eine Folge symbolischer oder logischer Lehrsätze, die einem symbolischen System entstammen, in dem nach Regeln oder Gesetzen Sätze formuliert und transformiert werden (symbolische Repräsentation).“ (Bruner, 1974, S. 49)

Symbole bieten hierbei die Möglichkeit der Verdichtung. Es werden somit, beispielsweise bei einer Formel, viele Informationen auf wenig Raum repräsentiert. Bruner

¹Unterschiedliche Ansätze zur Klassifikationen von Darstellungen werden in ähnlicher Form in Geyer und Kuske-Janßen (2019) zusammengefasst. Einen grundlegenden Zugang zur Bedeutung externer Repräsentationen für das Lernen von Physik bieten Krey und Schwanewedel (2018).

bezieht dies auch auf die Theorie Georg Millers, der die Kapazität des menschlichen Arbeitsgedächtnisses als auf 7 ± 2 Einheiten beschränkt erklärte. Treffend bezieht Bruner dies auf die Möglichkeiten, die semantisch verdichtete Darstellungsformen bieten: „Ich möchte hier nur kurz darauf verweisen, daß Verdichtung oder Zusammenfassung die Mittel sind, mit deren Hilfe wir unsere sieben Einwurfschlitze mit Gold statt mit wertlosem Zeug füllen.“ (Bruner, 1974, S. 18) Bruner beschreibt außerdem unter dem Begriff der Ökonomie die Informationsmenge, die in einer Repräsentation gespeichert und verwertet werden muss. Eine Formel nennt er als Beispiel (einer symbolische Repräsentation), ökonomisch viele Informationen zusammenzufassen (vgl. Bruner, 1974, S. 49). Bruner betont die Wichtigkeit, SchülerInnen durch diese unterschiedlichen Repräsentationen zu führen und sie so Schritt für Schritt zu befähigen, komplexere symbolische Repräsentationen zu verstehen (vgl. Bruner, 1974, S. 53). Dies lässt sich darauf beziehen, dass der Physikunterricht insbesondere im Bereich der symbolisch verdichteten Darstellungsformen, zu denen Sprache allgemein, insbesondere aber auch Formeln zu zählen sind, Angebote machen muss, die Lernende dabei unterstützen, die Inhalte dieser Repräsentation zu entschlüsseln und in ihnen vertrautere Formen zu übersetzen.

Eine Klassifikation für Darstellungsformen des Mathematikunterrichtes findet sich in Prediger und Wessel (2011). Sie unterscheiden in symbolisch-algebraische, symbolisch-numerische, verbal-fachsprachliche, verbal-bildungssprachliche, verbal-alltags-sprachliche, graphische, und gegenständliche Darstellungen. Von symbolisch-algebraischen zu gegenständlichen Darstellungen sind diese nach absteigender Abstraktion geordnet. Diese Abstraktionshierarchien können jedoch je nach Kontext und Thema auch anders verlaufen.

Für mathematische Darstellungen im Physikunterricht wurde aufbauend auf Bruner (1974) und Prediger und Wessel (2011) eine Klassifizierung entwickelt, die in Abbildung 5.2 dargestellt ist. Im Vergleich zu Prediger und Wessel (2011) werden unter den mathematischen Darstellungen zusätzlich graphische Darstellungen ergänzt. Bildliche und gegenständliche Darstellungen werden je in ikonische Darstellungen (Repräsentation und Dargestelltes sind mit einem Ähnlichkeitsverhältnis verknüpft) und symbolische Darstellungen (Darstellung und Dargestelltes sind ohne Ähnlichkeitsverhältnis aufgrund von Konventionen verknüpft) unterschieden. Da mathematische Darstellungen auch innerhalb der verbalen Darstellungen zu finden sind, wird zwischen rein mathematischen Darstellungen und verbalen Darstellungen, die beispielsweise in fachsprachlichen Ausdrücken ebenfalls mathematische Darstellungen enthalten können, unterschieden. Für eine detailliertere Darstellung sei an dieser Stelle auf Geyer und Kuske-Janßen (2019) verwiesen.

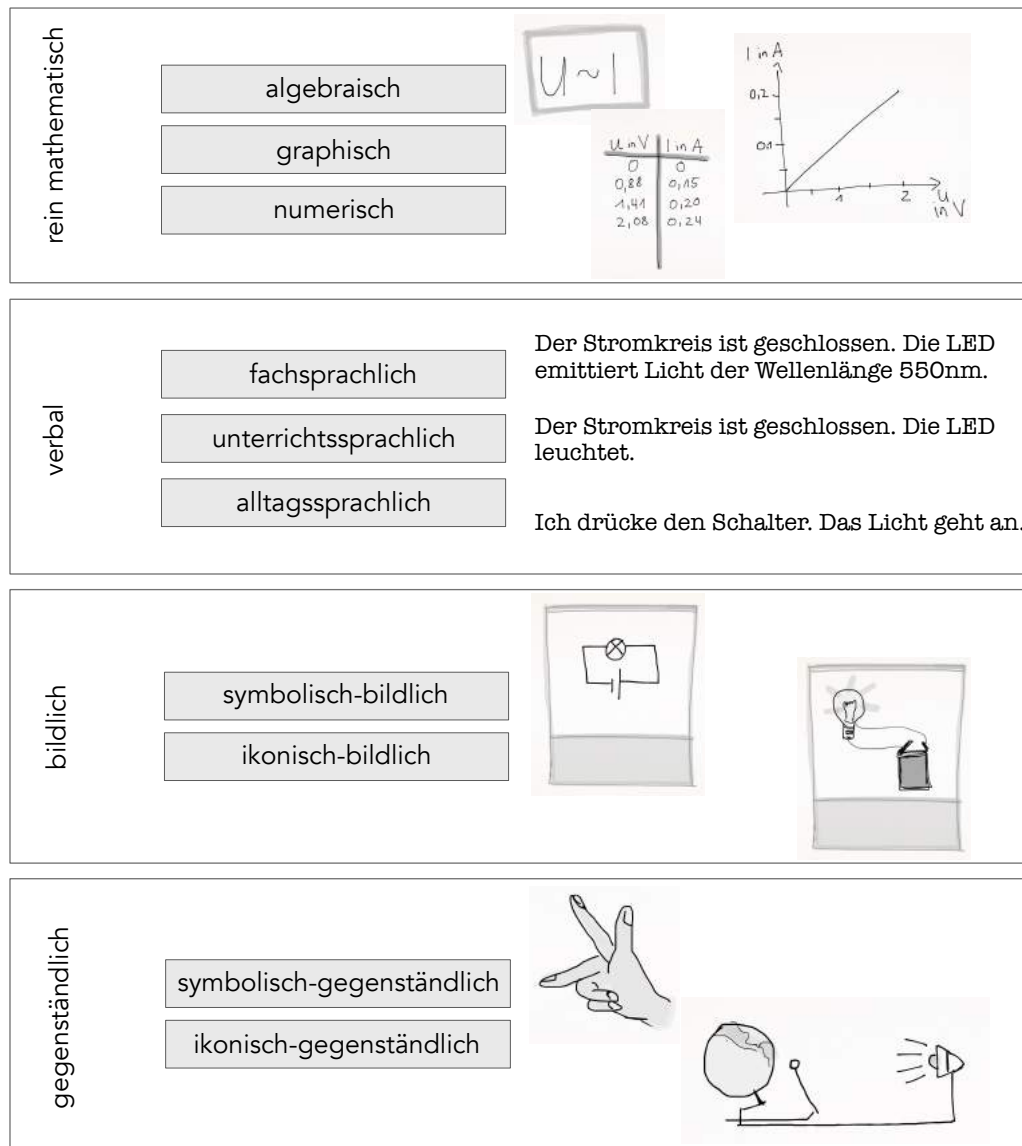


Abbildung 5.2.: Klassifikation von Darstellungen im Physikunterricht, adaptiert aus Geyer und Kuske-Janßen (2019, S. 81), übersetzt von Geyer und Kuske-Janßen

Prediger und Wessel (2011) und auch Leisen (2005b) plädieren dafür, unterschiedliche Darstellungsformen miteinander zu vernetzen. Lemke (2004) begründet ebenfalls die Nutzung multimodaler Repräsentationen im Physikunterricht mit der Schaffung tieferen Verständnisses durch Vernetzung unterschiedlicher Darstellungen (s. auch Kap. 3.1). Eine exemplarische Verknüpfung einzelner Darstellungsformen ist die Verbindung einer Formel mit verbalsprachlichen Äußerungen. Da Formeln für SchülerInnen einige Lernschwierigkeiten bereithalten (s. Kap. 3.3.5) und es SchülerInnen schwer fällt, die Bedeutung einer Formel im Sinne von Kapitel 3.3.2 zu erklären, erscheint eine verstärkte Verknüpfung mit solchen Darstellungsformen vielversprechend, die für SchülerInnen leichter zugänglich sind. Hierzu kann Verbalsprache als grundlegendes Kommunikationsmittel im Alltag und im Fach gezählt werden. Da Verbalsprache selbst jedoch keinesfalls als homogene Darstellungsform zu sehen ist, sondern in ihrer Form, Abstraktheit und Nähe zum Alltag stark differenziert ist, sollen sprachwissenschaftliche Überlegungen helfen, die Unterschiedlichkeit verbalsprachlicher Äußerungen zu Formeln differenzierter zu beschreiben.

5.2. Ebenenmodell der Versprachlichung als Implementation aus der germanistischen Sprachwissenschaft

In der germanistischen Sprachwissenschaft werden die Besonderheiten von Fachsprachen unterschiedlich beschrieben. Fachsprachen werden hier als Varietäten angesehen. Die Varietätenlinguistik beschreibt Teilgebiete von Sprache unter Berücksichtigung des gesamten Sprach(teil-)systems. Dies beinhaltet neben den typischen äußeren Sprachmerkmalen wie der Lexik und der Syntax auch Kommunikationsumstände und -funktionen. Sie bezieht somit den sozialen Kontext kommunikativer Handlungen mit ein (s. auch Kap. 4). Ein Ansatz, der für diese Arbeit von besonderer Bedeutung ist, ist die Beschreibung von Fachsprachen nach Lothar Hoffmann (1987). Grenzt man einzelne Varietäten voneinander ab, so spricht er von einer horizontalen Gliederung. Diese beschreibt beispielsweise Unterschiede zwischen der von PhysikerInnen genutzten Fachsprache in der Teilchenphysik und in der Festkörperphysik. Neben dieser horizontalen Gliederung weisen Fachsprachen nach Lothar Hoffmann (1987) auch eine vertikale Schichtung auf. Unterschiede in der Sprache zeigen sich dabei in den Kriterien Abstraktionsstufe, äußere Varietäten, Milieu und Kommunikationsteilnehmer (vgl. Tab. 5.1).

Hoffmann definiert die von ihm verwendeten Kategorien nicht explizit, aus den von ihm genannten Beispielen geht hervor, dass er unter natürlichsprachlich verbale

Sprache versteht, die in ihrem Aufbau der Alltagssprache ähnelt. Im Gegensatz dazu sind künstliche Symbole Zeichen, die in der Alltagssprache nicht vorkommen. Dies sind beispielsweise Noten, die für eine bestimmte Tonhöhe stehen, oder Symbole, die für mathematische Operatoren (+, –) oder auch Termini stehen (physikalische Formelzeichen).² Milieu bezeichnet einen gesellschaftlichen Bereich, in dem eine bestimmte Sprachvarietät genutzt wird. Da es sich in diesem Fall um eine Beschreibung von Fachsprachen handelt, bezieht sich die Beschreibung des Milieus auf unterschiedliche Anwendungsbereiche der Fachsprache und somit Arbeitsbereiche der KommunikationsteilnehmerInnen. Die äußere Sprachform beschreibt die (syntaktischen und lexikalischen) Merkmale der Sprache. Und unter steigender Abstraktionsstufe ist zu verstehen, dass die Sprache ähnlich dem durch sie vermittelten Kommunikationsgegenstand eine zunehmende Präzisierung erfährt, „je weiter diese im Zusammenhang mit ihrer ständigen Vervollkommenung als Erkenntnis- und Kommunikationsinstrument vom Konkreten zum Abstrakten, vom Besonderen zum Allgemeinen, von der Erscheinung zum Wesen vordringt.“ (Lothar Hoffmann, 1987, S. 64)

Hoffmann betont, dass die Schichten nicht trennscharf sind und häufig fließend ineinander übergehen oder auch Mischformen existieren. Außerdem thematisiert er, dass man darüber diskutieren könnte, ob die Schicht E noch zu den Fachsprachen oder schon zur Alltagssprache³ gehöre. Er begründet eine Zugehörigkeit zur Fachsprache mit seiner Einteilung der Varietäten nach Kommunikationsbereichen, die bestimmten Sachbereichen entsprächen. Damit ist nach Hoffmanns Definition auch diese sehr nah an der Alltagssprache angesiedelte Schicht Teil der Fachsprache. (Vgl. Lothar Hoffmann, 1987, S. 69)

Überträgt man dieses Modell auf die Fachsprache der Physik, so sind Formeln in der Schicht A anzuordnen. Sie enthalten ausschließlich künstliche Symbole. Diese repräsentieren zum einen physikalische Fachtermini, zum anderen mathematische Operatoren, die Beziehungen zwischen diesen Fachtermini beschreiben. Hoffmann

²Inwiefern unsere alltägliche Schriftsprache zu künstlichen Symbolen zu zählen ist, da auch sie nicht-lautlichen Symbolen Laute und damit über die gebildeten Wörter eine Bedeutung zuweist, wird aus Hoffmanns Ausführungen nicht ersichtlich. Kontrastierend schreibt Lothar Hoffmann (1987, S. 67) über die Vermischung verschiedener Ebenen und insbesondere das gleichzeitige Auftreten natürlicher Sprache und kunstsprachlicher Elemente: „Der Mathematiker geht, nachdem er ganze Seiten mit Gleichungen gefüllt haben mag, wieder zur natürlichen Sprache über. Der Logiker erläutert seine formalisierten Ausdrücke mit den Mitteln der natürlichen Sprache. Der Mediziner ‚übersetzt‘ dem Patienten seine Diagnose aus Schicht C in Schicht D. Der Soziologe streut in seinen Text statistische Formeln und Werte ein. Der Ökonom veranschaulicht seine verbale Darstellung durch ein Flußdiagramm usw. usf. Auch in Schicht D spielen – selbst in mündliche Rede eingebettet – Zahlen, Formeln, Zeichnungen u. ä. eine wesentliche Rolle.“ Hieraus wird ersichtlich, dass Hoffmann unter natürlicher Sprache die verbale Sprache meint, während künstliche Sprache mathematische Ausdrücke, Formeln, Graphiken sind.

³Lothar Hoffmann (1987) verwendet den Begriff Gemeinsprache.

bezieht in dieser Beschreibung Kommunikation im Kontext von Wissensvermittlung nicht explizit mit ein.

Die Tabelle 5.1 bezieht Hoffmanns Schichten auf die Sprache im Physikunterricht. KommunikationsteilnehmerInnen sind in diesem Fall immer LehrerInnen und SchülerInnen, die sich durch ein Wissensgefälle auszeichnen. Auf Seiten der KommunikationsteilnehmerInnen kann somit im Physikunterricht im Regelfall die Schicht A nicht vorgefunden werden. Da, wie bereits beschrieben, Formeln aber in die Schicht A einzuordnen sind und diese im Physikunterricht mehr oder weniger häufig genutzt werden, soll ungeachtet der KommunikationsteilnehmerInnen diese Schicht für die Verwendung von Formeln im Physikunterricht angenommen werden. In den Schichten B und C werden dann zunächst mathematische Symbole (entsprechen den Relationen / der Syntax des Satzes), anschließend physikalische kunstsprachliche Elemente (mathematische Symbole und Formelzeichen) durch ihre fachsprachlichen Termini ersetzt. D ist eine unterrichtssprachliche Beschreibung von Zusammenhängen, die Fachtermini nutzt, diese aber in möglichst verständliche Alltagssprache einbettet. Schicht E kann für Situationen im Unterricht angenommen werden, in denen Alltagsbeispiele beschrieben werden. Hier ist der fachsprachliche Anteil eher gering.

Aus dieser Übertragung der Schichten von Hoffmann auf den Physikunterricht resultiert die erste Version eines Ebenenmodells zur Versprachlichung von Formeln, das in Abbildung 5.3 dargestellt ist. In Tabelle 5.1 sind Beispiele für jede Ebene zu finden.

I	Formel
II	Formelsatz mit Formelzeichen
III	Formelsatz mit Termini
IV	Fachsprachliche Einbettung der Formel
V	alltagsnahe Kontextualisierung oder Interpretation in Alltagssprache

Abbildung 5.3.: Ebenenmodell der Versprachlichung von Formeln als Ableitung aus der Sprachwissenschaft

Schicht	Abstraktion	äußere Sprachform	Milieu	KommunikationsteilnehmerInnen
A	höchste	künstl. Symbole für Elemente und Relationen	theoret. Grundlagewissenschaften	Wissenschaftler $\Leftrightarrow$ Wissenschaftler
B	sehr hohe	künstl. Symbole für Elemente; natürl. Sprache für Relationen (Syntax)	experimentelle Wissenschaften	Wissenschaftler (Techniker) $\Leftrightarrow$ Wissenschaftler (Techniker) $\Leftrightarrow$ wiss.-techn. Hilfskräfte
C	hohe	natürl. Sprache mit sehr hohem Anteil an Fachtermini und streng determinierter Syntax	angewandte Wissenschaften & Technik	Wissenschaftler (Techniker) $\Leftrightarrow$ wiss. & techn. Leiter der materiellen Produktion
D	niedrige	natürl. Sprache mit hohem Anteil an Fachtermini und relativ ungebundener Syntax	materielle Produktion	wiss. und techn. Leiter der materiellen Produktion $\Leftrightarrow$ Meister $\Leftrightarrow$ Facharbeiter
E	sehr niedrige	natürl. Sprache mit Fachtermini und ungebundener Syntax	Konsumtion	Vertreter materieller Produktion $\Leftrightarrow$ Vertreter Handel $\Leftrightarrow$ Konsumenten $\Leftrightarrow$ Konsumenten
Schicht	Abstraktion	äußere Sprachform	Situation im PU	Beispiel
A	höchste	Formel	Tafelbild, Rechnung	$P = U \cdot I$
B	sehr hohe	Formelsatz	Sprechen über Formeln	P ist U mal I .
C	hohe	fachsprachlicher Satz ohne künstliche Symbole	Sprechen über Formeln	Leistung ist gleich Spannung mal Stromstärke.
D	niedrige	fachsprachlicher Satz mit zusätzlichen Informationen	Anwenden von Formeln	Um die Leistung einer Glühlampe zu berechnen, müsst ihr die abfallende Spannung und die Stromstärke messen.
E	sehr niedrige	alltagsnahe Beschreibung	Erklären von Formeln	Eine Lampe mit einer hohen Leistung leuchtet heller als eine mit niedriger Leistung.

Tabelle 5.1.: Vertikale Schichtung von Fachsprachen (Lothar Hoffmann, 1987, S. 64-71) & Adaption auf Physikunterricht (PU)

5.3. Induktive Anpassungen des Modells durch Vor- und Hauptstudien

Im Folgenden sollen die aus den Datenanalysen resultierenden Anpassungen des Modells vorgestellt werden. Diese sind im Grunde genommen Teil der Ergebnisdarstellung, aus Gründen der Vollständigkeit und Übersichtlichkeit der Arbeit sollen an dieser Stelle Ergebnisse vorweggenommen werden.

5.3.1. Ergänzung der Ebene IIA nach Lehrbuchanalysen

Als eine erste Anpassung folgt eine Veränderung der Ebene II. Lothar Hoffmann (1987) sieht für die vergleichbare Schicht B eine Verbalisierung der Symbole, die für Relationen der Wörter stehen, vor. Dies sind im Fall einer Formel die mathematischen Operatoren. Ein Beispiel für die Ebene II wäre somit, wie in Tabelle 5.1 dargestellt, „*P* ist *U* mal *I*“. Bei der Untersuchung von Lehrbüchern für den Physikunterricht, deren Ergebnisse detaillierter in Kapitel 8.1.1 dargestellt werden, wurde zusätzlich zu dieser Version mehrfach die Variante gefunden, dass die Symbole für die Operatoren erhalten bleiben, jedoch die physikalischen Formelzeichen in ihre entsprechenden Termini übersetzt werden. Für das genannte Beispiel wäre dies:

$$\text{elektrische Leistung} = \text{elektrische Spannung} \cdot \text{elektrische Stromstärke}$$

Diese Notation existiert nur in schriftlichen Aufzeichnungen. Sobald sie gesprochen wird, werden automatisch auch die kunstsprachlichen Symbole für die Relationen, die mathematischen Operatoren, verbalisiert. Die Übersetzung einer Klasse von Symbolen (der mathematischen Operatoren oder der physikalischen Formelzeichen) wird als gleiche Abstraktionsstufe gewertet. Daher wird die Ebene II aufgeteilt in Ebene IIA, in der Symbole für Relationen und natürliche Sprache für Elemente beziehungsweise Symbole für mathematische Operationen und physikalische Termini verwendet werden, und die Ebene IIB, in der Symbole für Elemente und natürliche Sprache für Relationen, beziehungsweise physikalische Formelzeichen und mathematische Operationen als Fachwörter genutzt werden. Die Abbildung 5.4 stellt das angepasste Ebenenmodell dar. Beispiele für jede Ebene werden in Abbildung 5.5 gegeben.⁴

Während die Ebenen I-III somit lediglich Informationen enthalten, die direkt der Formel selbst entnommen werden können, wenn die Zuordnungsregeln der Fachtermini

⁴Das Ebenenmodell wurde in ähnlicher Form bereits in verschiedenen Tagungsbänden (Janßen und Pospiech (2015), Janßen und Pospiech (2016d), Janßen und Pospiech (2016c)), in Janßen und Pospiech (2016a), sowie in Geyer und Kuske-Janßen (2019) veröffentlicht.

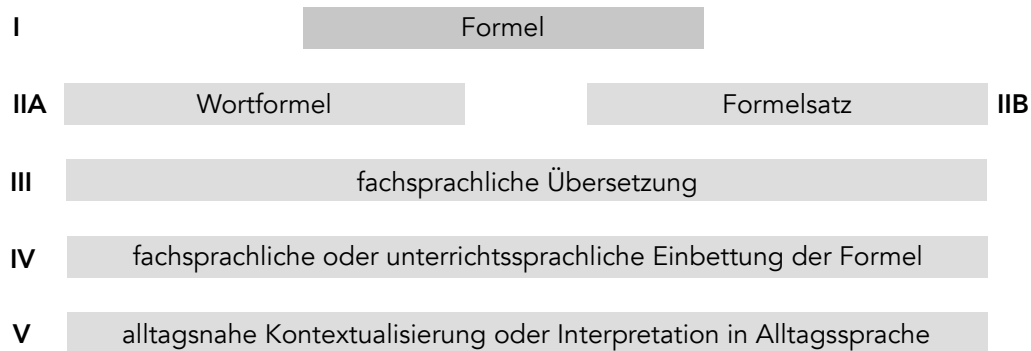


Abbildung 5.4.: Angepasstes Ebenenmodell der Versprachlichung von Formeln nach Lehrbuchanalysen

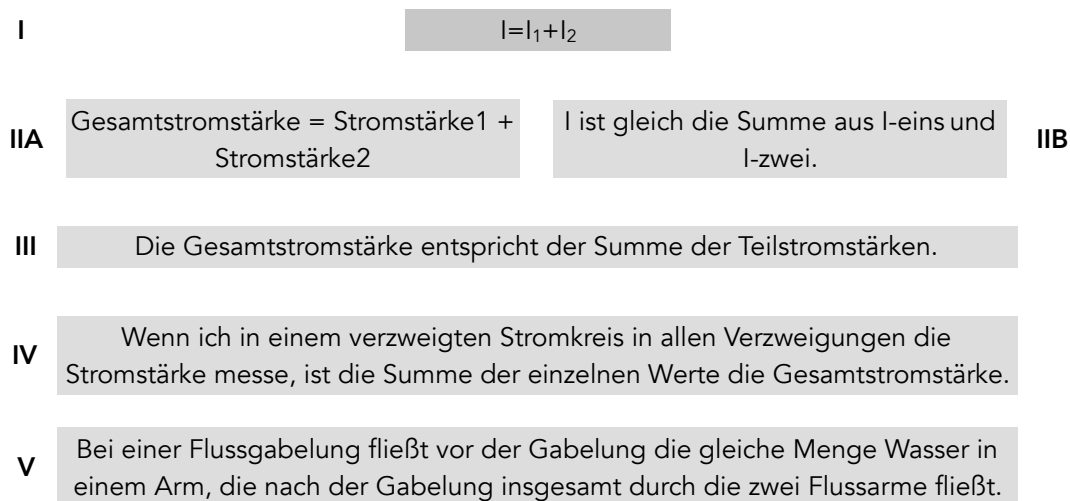


Abbildung 5.5.: Beispiel Ebenenmodell der Versprachlichung von Formeln nach der Ergänzung der Ebene IIA

zu den Formelzeichen und der mathematischen Operationen zu den mathematischen Operatoren bekannt sind, werden in den Ebenen IV und V weitere Informationen hinzugezogen.

Auf Ebene IV findet eine Kontextualisierung der Formel statt. Neben der Bedeutung der in der Formel vorkommenden Zeichen, muss hier inhaltlich weiteres Wissen hinzugefügt werden. Dies kann beispielsweise Wissen über die physikalische Theorie sein, in welche die Formel eingebettet ist, oder auch mathematische Implikationen wie jebdesto-Aussagen. Die Formel kann hier außerdem interpretiert werden, indem die Art ihrer Aussage beschrieben wird. So wird sie beispielsweise als Gesetz, Prozessbeschreibung, Definitionsgleichung, empirische Gesetzmäßigkeit oder Berechnungsvorschrift beschrieben (s. Kap. 3.3). Außerdem kann ein Bezug zu einem Experiment hergestellt werden, die Theorie, in der die Formel eingebettet ist, oder der physikalische Vorgang, den die Formel beschreibt, benannt werden. Es können mathematische Gültigkeitsbedingungen oder physikalische Randbedingungen genannt werden. Zu möglichen mathematischen Interpretationen können außerdem auch die *symbolic forms* von Sherin (2001) hinzugezogen werden (s. Kap. 3.3).

Ebene V bettet die Formel inhaltlich und sprachlich stärker in einen alltagsnahen Kontext ein. Die Formel wird auf Alltagsbeispiele angewendet oder es werden einzelne Aussagen der Formel mit alltagsnahen Analogien und Modellen veranschaulicht.

5.3.2. Ausdifferenzierung der Ebene IV und Ergänzung der Ebenen VI und Meta-Ebene nach Hauptstudie

Im Rahmen der Hauptstudie zeigte sich die enorme Bandbreite der Ebene IV. Diese umfasst Aussagen, die sehr nah an der mathematischen Aussage der Formel sind und vorrangig in Fachsprache formuliert werden, beispielsweise für die Formel $s = v \cdot t$ die Aussage „Der Weg ist proportional zur Zeit“. Gleichzeitig finden sich hier unterrichtssprachliche Aussagen, die beispielsweise die Zusammenhänge einer Formel mit Hilfe eines Modells interpretieren, z. B. für die Grundgleichung der Wärmelehre $Q = m \cdot c \cdot \Delta T$ die Aussage „Wenn ich einem System Wärme hinzufüge, dann bewegen sich die Teilchen stärker. Dies führt zu einer höheren Temperatur.“ Gleichzeitig fanden sich in den Analysen der Unterrichtsstunden, die in Kapitel III dargestellt werden, kaum tatsächliche alltagssprachliche Aussagen. Dies führte zu einer enormen Aufweitung der Ebene IV, während die Ebene V kaum auftrat. Um die erhaltenen Ergebnisse besser darstellen zu können, wurde daher das Ebenenmodell nach unten verschoben. Ebene IV wird aufgeteilt, sodass fachsprachliche und unterrichtssprachliche Aussagen in getrennten Ebenen (IV und V) dargestellt werden. Es schließt sich eine Ebene

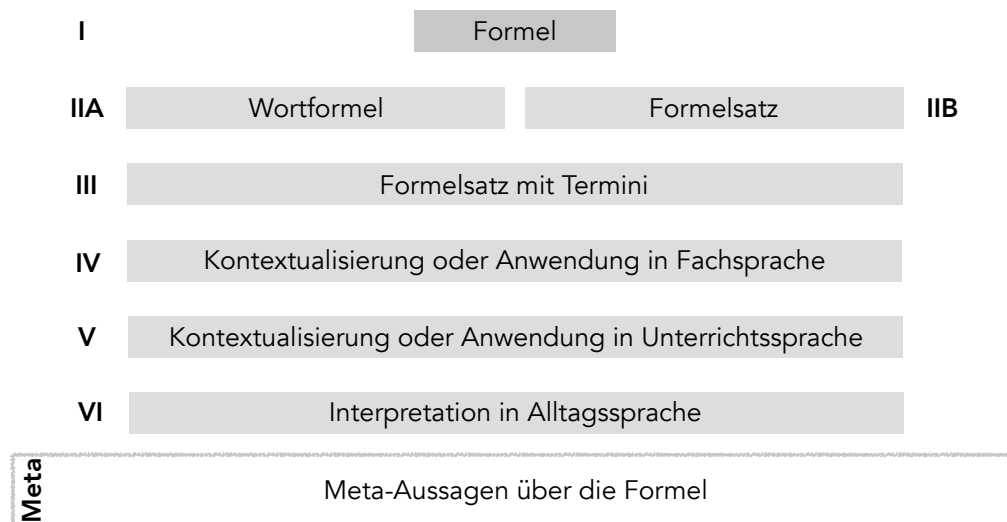


Abbildung 5.6.: Finales Ebenenmodell der Versprachlichung von Formeln

VI an, die alltagssprachliche Aussagen umfasst. Außerdem wurden Aussagen, *über* die Formel als Aussagen grundsätzlich anderer Art aufgefasst, die in eine separate Ebene, eine Meta-Ebene fallen. Hierzu zählen Aussagen zu Gültigkeitsbedingungen und zum Anwendungsbereich einer Formel, dem Aussagecharakter der Formel oder den Vorteilen einer Formel gegenüber anderen Darstellungsformen. Das angepasste Ebenenmodell findet sich in Abbildung 5.6.

Für diese Anpassungen lassen sich auch aus der Theorie Argumente finden. So kann die Ebene VI als eine Ebene außerhalb der Fachsprache verstanden werden, die somit auch bei der vertikalen Schichtung von Fachsprachen nach Lothar Hoffmann (1987) keine Berücksichtigung findet. Hoffmanns Schichten würden sich somit in den Ebenen I-V widerspiegeln, für die Sprache im Unterricht muss zusätzlich die Alltagssprache berücksichtigt werden, die als Ebene VI ergänzt wird. Die separate Betrachtung von Fachsprache, Unterrichtssprache und Alltagssprache ist auch aus Perspektive der Fachdidaktik sinnvoll und findet sich, wie in Kapitel 4.2, bei vielen AutorInnen, wie beispielsweise bei Leisen (2005a) wieder.

5.4. Beschreibung des Ebenenmodells

Folgend soll nun das in Abbildung 5.6 dargestellte Modell für die Versprachlichung von Formeln nochmals im Detail beschrieben werden. Das Modell wurde als deskriptives Instrument entwickelt und soll helfen, sprachliches Handeln mit Formeln im Physikunterricht zu beschreiben. Es gibt erlaubt keine normativen Aussagen oder

Wertungen verschiedener Aussagen zu einer Formel. Auch eine bestimmte Reihenfolge der Verwendung von Ebenen im Unterricht wird durch das Modell nicht vorgegeben. Vielmehr soll es helfen, die Vielfalt möglicher Aussagen, die mit einer Formel in Verbindung zu sehen sind und helfen können, ein vertieftes Formelverständnis zu erzeugen, aufzuzeigen, zu beschreiben und zu unterscheiden.

Die *Ebene I* zeichnet sich durch eine besonders hohe semantische Dichte aus. Hier ist auf sehr wenig Raum viel Inhalt verpackt. Die physikalischen Formelzeichen repräsentieren Fachtermini, die ihrerseits eine hohe semantische Dichte aufweisen und vom "Formelleser" verlangen, sein Vorwissen in den Lese- und Verstehensprozess einzubringen. Der Sprachwissenschaftler Kalverkämper drückt sich hierzu wie folgt aus:

„Die Fachsprache repräsentiert das Fachwissen dabei vorzugsweise in den Termini: diese speichern es als Definition, als genormten Text; die Definition ihrerseits wird mitverstanden und als Fachwissen-Inhalt einbezogen, wenn der Terminus in der Fachkommunikation auftaucht; man kann es auch so formulieren: das Vorkommen eines Terminus ist die Anweisung an den Rezipienten, sein Vorwissen zu der Terminus-Definition in den Text-Verstehensprozeß einzubringen“ (Kalverkämper, 1998, S. 15)

In der sprachwissenschaftlichen vertikalen Schichtung von Fachsprachen nach Lothar Hoffmann (1987) ist in Schicht B, die mit der Ebene II zu vergleichen ist, lediglich natürliche Sprache für die im Fall einer Formel mathematische Syntax des Ausdruckes vorgesehen. Im Falle einer Formel lassen sich zwei unterschiedliche Kategorien künstlicher Elemente finden, die jeweils in natürliche Sprache übertragen werden können: physikalische Formelzeichen, die Fachtermini repräsentieren, und mathematische Zeichen, die mathematische Operatoren und damit zum einen eine Art Handlungsanweisung, zum anderen aber auch eine eigene Semantik verkörpern und die physikalischen Fachtermini miteinander in Relation setzen. Daher wird im Ebenenmodell von einer Zweigliederung der Ebene II ausgegangen. In *Ebene IIA* werden lediglich physikalische Formelzeichen in ihr fachsprachliches Pendant übersetzt. Dies kann nur in schriftsprachlicher Form, beispielsweise an der Tafel, stattfinden. In *Ebene IIB* werden nur die mathematischen Zeichen natürlichsprachlich ausgedrückt, die Symbole für die physikalischen Fachtermini bleiben bestehen.

In *Ebene III* werden alle Formelzeichen natürlichsprachlich ausgedrückt. Es wird somit die verdichtete Semantik der Formelzeichen in ein fachsprachliches Pendant entpackt. Diese Darstellung enthält alle Informationen, die in der Formel gegeben sind, ist aber auch nicht durch weitere Informationen angereichert. Solange die Zuordnungsvorschriften der Formelzeichen und mathematischen Symbole zu den Fachtermini

und mathematischen Operationen bekannt sind, kann problemlos zwischen diesen drei Ebenen in beide Richtungen übersetzt werden.

Die *Ebene IV* ist eine Anwendung oder Interpretation der Formel in Fachsprache. Die Aussagen, die hier gemacht werden, sind quantitativer oder halbquantitativer Natur. Hier sind somit Rechnungen mit der Formel einzuordnen, aber auch die mathematische Herleitung einer Formel aus anderen Formeln oder aus Proportionalitäten. Außerdem können hier Aussagen eingeordnet werden, bei denen mit Hilfe der Formel oder der Zusammenhänge, die in der Formel dargestellt werden, etwas erklärt wird. Dies kann beispielsweise ein Experiment oder eine Anwendung sein. Auch mathematische Ableitungen aus der Formel, wie Proportionalitäten zwischen Größen oder dem mathematischen Explorieren des Verhaltens von Größen. Dieses Explorieren mit Hilfe der Formel beschreibt Lehavi *et al.* (2019) als „Exploration Pattern“ (s. Kap. 3.3.3). Auch Aussagen, die mit den symbolic forms von Sherin (2001) oder den Grundvorstellungen von Hofe (1992) verwandt sind, sind hier einzuordnen (s. Kap. 3.3.2).

Ebene V beinhaltet Aussagen in Unterrichtssprache. Hierbei werden in der Regel physikalische Fachtermini verwendet, diese aber mit einfacherer Syntax verknüpft. Auch werden zum Teil nicht die streng definierten Fachtermini, sondern andere Fachbegriffe verwendet, beispielsweise wird von Stromfluss statt von Stromstärke gesprochen. Auch Beschreibungen der einzelnen Größen, die in der Formel vorkommen, sind hier zu verorten, da sie für das Verständnis der Formel als Ganzes eine große Relevanz haben. Die Beschreibung mathematischer Zusammenhänge zwischen den Größen sind dann auf Ebene V einzuordnen, wenn sie die Art der Abhängigkeit der Größen nicht näher beschreiben, sondern lediglich benennen, dass es eine solche Abhängigkeit gibt. Eine weitere Möglichkeit ist die Veranschaulichung von Zusammenhängen der Formel mit Hilfe eines Modells. Beispiele hierfür wäre eine Verknüpfung der Grundgleichung der Wärmelehre mit dem Teilchenmodell oder Formeln der Elektrizitätslehre mit dem Modell der Elektronenleitung.

Wenn der Zusammenhang der Formel in alltagsnahe Analogien übertragen wird oder allgemein gesprochen Alltagssprache verwendet wird, um eine Formel zu interpretieren, dann wird die Aussage in *Ebene VI* eingeordnet. Da hier eine starke Vereinfachung vorgenommen wird und immer nur einzelne Aspekte der Gesamtaussage der Formel fokussiert werden, sind die Aussagen physikalisch gesehen selten vollständig korrekt. Es ist bekannt, dass jede Analogie, die wir nutzen, ihre Stärken und Schwächen hat. Der didaktische Mehrgewinn von Analogien durch ihre Alltags- und dadurch Schülernähe liegt aber auf der Hand.

Die Ebenen IV, V und VI unterscheiden sich dabei in unterschiedlichen Dimensionen. Sie unterscheiden sich in der Sprache, die verwendet wird, in dem Grad der Quan-

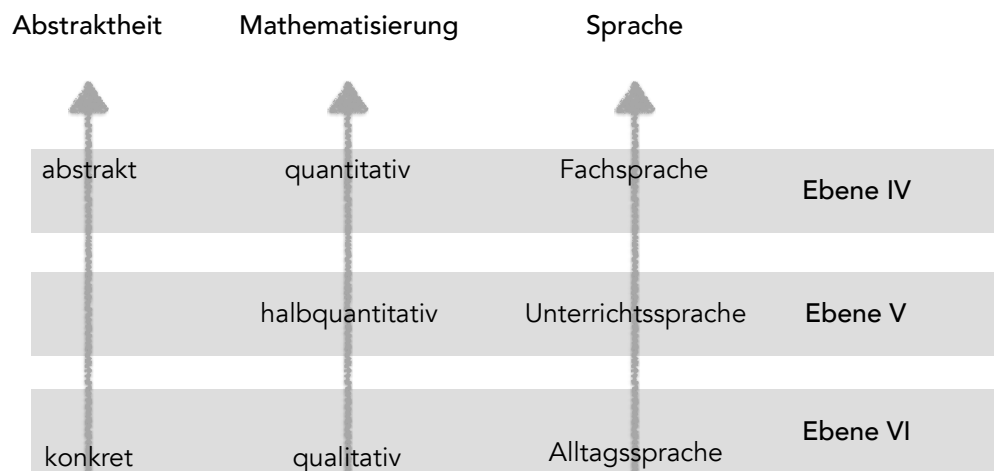


Abbildung 5.7.: Ausprägung der Dimensionen Abstraktheit, Mathematisierung und Sprache in den Ebenen IV, V und VI

tisierung und in Anlehnung an Lothar Hoffmann (1987) und Leisen (2005a) in der Abstraktheit (s. Abb. 5.7). Insbesondere die Dimensionen der Sprache und der Abstraktheit sind dabei nicht disjunkt, sondern stellen vielmehr kontinuierliche Skalen in der Ausprägung unterschiedlicher Merkmale dar. Dies erschwert eine eindeutige Zuordnung einer Aussage zu einer der Ebenen. In Grenzfällen müssen daher die unterschiedlichen Dimensionen gegeneinander abgewogen werden. Zur Unterscheidung der unterschiedlichen Sprachebenen sei an dieser Stelle auf Abschnitt 4.3 verwiesen.

Die Ebene *Meta-Ebene* ist grundsätzlich als losgelöst von den anderen Ebenen zu betrachten. Während in den Ebenen I-III die Formel selbst gesprochen und in den Ebenen IV-VI die Formel angewendet oder interpretiert wird, stellen die Aussagen in dieser Ebene keine Aussagen über den Inhalt der Formel, also die in ihr vorkommenden Größen und ihr Verhältnis zueinander dar. Vielmehr werden hier generelle Aussagen *über* die Formel getroffen. Hierzu zählen Gültigkeitsbedingungen oder Anwendungsbereiche der Formel, Analogie zu anderen Formeln aufgrund ihrer mathematischen Struktur, Merkhilfen oder die erkenntnistheoretische Klassifikation von Formeln, wie sie beispielsweise von Karam und Krey (2015) beschrieben wurde (s. Kap. 3.3.2). Diese erkenntnistheoretische Klassifikation kann explizit geschehen, indem die Lehrkraft eine Formel beispielsweise als Berechnungsvorschrift, empirische Gesetzmäßigkeit oder Definition bezeichnet. Sie kann aber auch implizit vermittelt werden, indem darüber gesprochen wird, *wozu* eine Formel benötigt wird (zum Beispiel zum Berechnen oder zum Zusammenfassen empirischer Daten). Außerdem werden Aussagen in die Meta-

Ebene eingeordnet, die Vorteile oder Eigenschaften von Formeln generell beschreiben, wie die in Kapitel 2.1.2 beschriebenen Funktionen der Mathematik in der Physik oder Aussagen, die auf eine Vermittlung von „metarepresentational competence“, also Fähigkeiten und Wissen *über* Formeln als Darstellungsformen (vgl. diSessa, 2004; Lemke, 2004) schließen lassen (s. Kap. 3.1).

Die folgende Übersicht in Tabelle 5.2 fasst die Beschreibungen der Ebenen zusammen und nennt Beispiele:

Ebene	Beschreibung	Beispiele
I	Formel	$F = m \cdot a$
IIA	Formel mit physikalischen Termini	<i>Kraft = Masse · Beschleunigung</i>
IIB	Formelsatz mit Formelzeichen	F ist gleich m mal a .
III	Formelsatz mit physikalischen Termini	Kraft ist gleich das Produkt aus Masse und Beschleunigung.
IV	Rechnungen Herleitungen Proportionalitäten je-desto-Aussagen Erklärungen von Experimenten oder (technischen) Anwendungen mit Hilfe der Formel	Je größer die Kraft ist, die auf einen Körper wirkt, desto größer die Beschleunigung, die er erfährt. Der Wagen auf der Luftkissenbahn ist schneller als beim ersten Mal. Das liegt daran, dass wir eine größere beschleunigende Masse angehängt haben und damit die Kraft größer ist, die auf den Wagen wirkt.
V	Beschreibung des Zusammenhanges mit Hilfe von Modellen qualitative Beschreibung oder Nennung von Experimenten oder Anwendungen Beschreibung der Abhängigkeiten von Größen in Unterrichtssprache Benennung von Abhängigkeiten der Größen	Der Zusammenhang von Kraft, Masse und Beschleunigung kommt zum Beispiel beim Bremsen oder Beschleunigen eines Fahrzeugs zum Tragen. Wenn ihr hier stärker zieht, dann wird der Wagen also schneller. Andere Masse, andere Beschleunigung.

Ebene	Beschreibung	Beispiele
VI	Beschreibung der in der Formel vorkommenden Zusammenhänge mit Hilfe alltagsnaher Analogien	Es ist Sonntag. Regen. Ihr liegt auf der Couch und schaut eure Lieblingsserie. Eure beste Freundin ruft an und will euch zu einem Spaziergang motivieren. Die hat es dann viel schwerer, als wenn ihr euch sowieso gerade langweilt und draußen die Sonne scheint. So könnt ihr euch das vorstellen mit unterschiedlichen Massen, die beschleunigt werden sollen.
Meta-Ebene	Analogien zu anderen Formeln Klassifizierung der Formel Vorteile einer Formel Gültigkeitsbedingungen und Anwendungsbereich	Mit der Formel können wir rechnen. Die Formel fasst die Ergebnisse von Experimenten zusammen. Die Formel ist ja viel kürzer als wenn ihr euch ganz viel Text merken müsst.

Tabelle 5.2.: Beschreibung der Ebenen des Ebenenmodells mit Beispielen

Werden die Ebenen ineinander übergeführt, so finden von I zu VI Übersetzungs- und Interpretationsprozesse statt. Wird in umgekehrter Reihenfolge zwischen den Ebenen VI bis I überführt, dann werden Ausdrücke mathematisiert. Das Ebenenmodell gibt dabei keine feste Reihenfolge vor, es können selbstverständlich im Mathematisierungs- oder Interpretationsprozess auch Ebenen ausgelassen werden.

Die Ebenen I bis III enthalten prinzipiell die gleichen Informationen und können ohne Informationsverlust oder -gewinn überführt werden. Die Ebenen IV, V und VI unterscheiden sich inhaltlich stark von diesen. Hier werden zusätzliche Informationen für die Kontextualisierung, Anwendung oder Interpretation der Formel benötigt oder nur Teilaussagen aus der Formel gezogen, während der Gesamtzusammenhang vernachlässigt wird (beispielsweise werden nicht alle in der Formel vorkommenden Größen betrachtet, sondern nur zwei). Die Ebenen IV, V und VI stellen somit eine Anwendung oder Interpretation der Formel dar. Aus diesem Grund gibt es hier eine Vielzahl möglicher Aussagen. Oftmals ist es schwer, eine Aussage direkt als richtig oder falsch einzuordnen. Mit der Bedeutungen von Interpretationen in der Physik beschäftigen sich beispielsweise auch Heywood und Parker (2010), die das besonde-

re Verhältnis von Physik und Interpretationen treffend zusammenfassen und damit einen Hinweis liefern, warum viele Physiklehrkräfte ein gewisses Unbehagen haben könnten, wenn sie sich sprachlich auf diesen Ebenen bewegen:

„Contemporary hermeneutics allows for a range of possible interpretations and implies that no one interpretation can ultimately be decided upon; a condition in which meaning is deferred because there always remains the possibility of an alternative interpretation. This idea rests somewhat uneasily with a correspondence theory of truth sometimes attributed to the natural sciences where there is an attempt to decide between competing theories on the basis of objectively collated empirical evidence.“ (Heywood und Parker, 2010, S. 103)

Auch Muckenfuß (1995) betont die Interpretation physikalischer Fachsprache im Allgemeinen und von Formeln im Besonderen als wesentlichen Teil des Lern- und Verständnisprozesses. Gleichzeitig bemerkt er jedoch, dass eine solche verbalsprachliche Interpretation nie die vollständige physikalische Bedeutung des ursprünglichen Ausdrucks beinhalten kann:

„Eine physikalische Gleichung, eine physikalische Begriffsdefinition oder ein formal formuliertes Gesetz sind aber ebensowenig vollständig durch Sprache zu ersetzen wie ein Kunstwerk.“ (Muckenfuß, 1995, S. 259)

Das Ebenenmodell stellt somit eine Möglichkeit dar, sprachliche Aussagen in Bezug auf Formeln zu beschreiben und zeigt vielfältige Möglichkeiten der Verbalisierung, Anwendung und Interpretation von Formeln auf. In Kapitel 13 wird es genutzt, um die Ergebnisse der empirischen Studie, also das Sprechen von LehrerInnen im Unterricht, zu analysieren.

6. Zusammenfassung: Fragen aus der Theorie an die Hauptstudie

Aus der dargestellten Theorie lassen sich zusammenfassend Forschungsdesiderata aufzeigen, die zu den in Kapitel 7 dargestellten Forschungsfragen führen und mit Hilfe des dort vorgestellten Forschungsdesigns beantwortet werden sollen.

Vor dem theoretischen Hintergrund zu multiplen Darstellungsformen und ihrer Rolle für das Lehren und Lernen von Physik (s. Kap. 3.1) erscheint es sinnvoll und notwendig, SchülerInnen unterschiedliche Darstellungsformen eines Sachverhaltes in Vermittlungskontexten anzubieten und auch explizit das Lernen *über* Darstellungsformen wie Formeln zu fördern. Mit Schwerpunkt auf die Darstellungsformen Formel und verbale Sprache stellt sich nun die Frage, wie und ob LehrerInnen dies in der Unterrichtspraxis umsetzen. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass im Sinne der Zeichentheorie de Saussures jede sprachliche Aussage als Zeichen eine individuelle Interpretation eines Objektes ist (s. Kap. 4.1). Auch das Sprechen über Formeln und ihren Inhalt stellt somit immer eine individuelle Interpretation der Formel dar und es stellt sich die Frage, welche unterschiedlichen Interpretationen von Formeln LehrerInnen ihren SchülerInnen im Physikunterricht kommunizieren.

In Kapitel 3.3 wurden aus theoretischen Überlegungen heraus, sowie aus der Sicht von LehrerInnen und SchülerInnen dargestellt, was Formelverständnis ausmacht. Insbesondere vor dem Hintergrund der Stärkung der strukturellen Rolle von Mathematik im Allgemeinen und Formeln im Besonderen, ist es relevant, Formeln inhaltlich zu betrachten und die Verknüpfung zu physikalischen Theorien, Modellen und Erklärungen zu verdeutlichen. Es zeigte sich, dass die Bedeutung von Formeln sehr unterschiedliche Aspekte beinhaltet, die beispielsweise durch semantische Netzwerke dargestellt werden können (vgl. Redish und Kuo, 2015). Zu Formelbedeutung gehören in Anlehnung an die jeweiligen AutorInnen:

- Bedeutung der einzelnen Formelzeichen (Domert *et al.*, 2012)
- Kenntnis der dargestellten und für das Arbeiten mit einer Formel notwendigen mathematischen Operationen im Sinne mathematischer technischer Grundkom-

petenzen (Domert *et al.*, 2012; Airey, Lindqvist und Kung, 2019)

- Erkennen der mathematischen Struktur der Formel und wie sich in Folge dessen die einzelnen Größen zueinander verhalten (Domert *et al.*, 2012): Dies kann beispielsweise durch die Betrachtung von Extrem- und Spezialfällen unterstützt werden (Bagno, Eylon und Berger, 2011). Hierzu gehört auch die Betrachtung einzelner Terme der Formel und eine Reflexion ihrer mathematischen und physikalischen Bedeutung (Airey, Lindqvist und Kung, 2019; Hechter, 2010)
- Inhaltliche mathematische Grundvorstellungen zur Bedeutung der Rechenoperationen, die von der physikalischen Bedeutung der Formel abhängig sind (vgl. Hofe und Blum, 2016; Sherin, 2001)
- Kenntnis des physikalischen Hintergrunds der Formel: Hierzu gehören die Bedeutung der einzelnen Größen, Konzepte und Prinzipien, Einbettung in Theorie (Domert *et al.*, 2012).
- Reflexion der Bedeutung des Gleichheitszeichens: Gleichheitszeichen sollte in physikalischen Formeln nicht als reine Handlungsaufforderung verstanden werden, sondern ihre spezifische inhaltliche Bedeutung sollte reflektiert werden, die von der physikalischen Aussage der Formel abhängt (vgl. auch Kieran, 1981; Heck und Buuren, 2019; Wilhelm, 2013).
- Verständnis für die Einheitengleichheit auf beiden Seiten der Formel und Reflexion des Rechnens mit unterschiedlichen Einheiten (Karam, Uhden und Höttecke, 2019)
- Epistemologische Überlegungen zur Aussageart der Formel (Karam und Krey, 2015; Romer, 1993)
- Wissen über die Herleitung der Formel (Karam und Krey, 2015; Domert *et al.*, 2012; Airey, Lindqvist und Kung, 2019)
- Wissen über physikalischen Anwendungsbereich der Formel: Gültigkeitsbereich, zugrundeliegende Näherungen und Idealisierungen (Domert *et al.*, 2012; Airey, Lindqvist und Kung, 2019)
- Bezug zu anderen Formeln und wie sie inhaltlich und in ihrer mathematischen Struktur mit der betrachteten Formel zusammenhängen (Airey, Lindqvist und Kung, 2019)

- Verknüpfung mit anderen Darstellungsformen wie Graphen (Airey, Lindqvist und Kung, 2019)
- Verknüpfung mit dem Alltag oder Experimenten: Wo findet die Formel Anwendung? Welche Situationen beschreibt sie? Wofür kann sie genutzt werden? (Domert *et al.*, 2012; Airey, Lindqvist und Kung, 2019)
- Erklärung der Aussage der Formel mit alltagsnahen Analogien (Domert *et al.*, 2012)

Eine so umfassende Formelbedeutung kann in Teilen beispielsweise durch Interpretationsaufgaben (Bagno, Eylon und Berger, 2011) oder die von Lehavi *et al.* (2019) beschriebenen Pattern (Exploration, Construction, Broadening, Application) vermittelt werden. Darüber hinaus stellt sich die Frage, welche Aspekte dieses umfangreichen Formelverständnisses im Physikunterricht durch LehrerInnen tatsächlich angesprochen werden.

In Kapitel 4 wurde die besondere Rolle von Sprache und den im Physikunterricht relevanten sprachlichen Varietäten Alltagssprache, Unterrichtssprache und Fachsprache in Vermittlungskontexten dargestellt. Es wurde dargelegt, dass fachsprachliche Kompetenz, auch im Sinne eines Verstehens und Beherrschens fachtypischer Darstellungsformen, zentrales Ziel des Physikunterrichtes ist. Gleichzeitig muss die den SchülerInnen aus dem Alltag bekannte Sprache insbesondere beim Lernen neuer (physikalischer) Inhalte als „Sprache des Verstehens“ (Wagenschein, 1988, S. 137) eine wichtige Rolle spielen. Gleichzeitig ist es zentrales Ziel des Physikunterrichtes, SchülerInnen fachsprachlich kompetent zu machen. Für das Lernen einer Fachsprache und einzelner Darstellungsformen ist ein expliziter Metadiskurs sinnvoll und notwendig (Rincke, 2010; Lemke, 2004; diSessa, 2004, vgl.). Die Rolle der unterschiedlichen sprachlichen Varietäten erscheint besonders in Vermittlungskontexten relevant und interessant, die sich auf für SchülerInnen problematische fachliche Konzepte und Darstellungsformen beziehen. Da Formeln eine große Relevanz für die Physik und den Physikunterricht haben und gleichzeitig SchülerInnen insbesondere mit der Verbalisierung von Formelbedeutungen Schwierigkeiten zeigen (s. Kap. 3.3.5), soll das Sprechen von LehrerInnen mit und über Formeln näher untersucht werden. Hierbei soll auch berücksichtigt werden, wie und ob LehrerInnen Kenntnisse über Formeln als spezifische Darstellungsform der Physik vermitteln.

Um das Sprechen mit und über Formeln beschreiben zu können, wurde ein Ebenenmodell der Versprachlichung von Formeln entwickelt und in Kapitel 5 dargestellt. Mit Hilfe dieses Modells soll beschrieben und analysiert werden, welche Rolle unterschied-

liche sprachliche Varietäten bei der Vermittlung von Formeln und ihrer Bedeutung im Physikunterricht spielen.

Teil II.

Methodik

7. Forschungsdesign

Im folgenden Kapitel werden zunächst die Forschungsfragen und das grundlegende Forschungsdesign, die dieser Arbeit zu Grunde liegen, vorgestellt. Als erste Ergebnisse werden zwei Untersuchungen zur Validierung des in 5.4 vorgestellten Ebenenmodells zur Versprachlichung von Formeln dargestellt. Hierfür wurde das Ebenenmodell zunächst genutzt, um Sprache in sächsischen Physikschulbüchern zu beschreiben. Anschließend wurde das Modell in einer Lehrerfortbildung präsentiert und diskutiert.

Der in Kapitel I dargestellte Forschungsstand zeigt, dass SchülerInnen sehr unterschiedliche Schwierigkeiten in Bezug auf Formeln haben. Es hat sich gezeigt, dass es SchülerInnen schwer fällt, Formelbedeutungen zu verbalisieren. Daher leitet sich als Forschungsdesiderat die grundsätzliche Frage ab, wie LehrerInnen im Unterricht sprachlich mit Formeln umgehen und welche Schwerpunkte sie dadurch in der inhaltlichen und methodischen Vermittlung von Formeln setzen. In dieser Arbeit soll folgende Forschungsfrage mit den Unterfragen 1-3 beantwortet werden:

In welcher Form und wie oft verbalisieren LehrerInnen Formeln im Physikunterricht?

1. Welche Ebenen der Versprachlichungen nutzen LehrerInnen?
2. Wie häufig werden Formeln von LehrerInnen im Physikunterricht sprachlich angewendet oder interpretiert im Vergleich zu reinem „Sprechen“ von Formeln?
3. In welcher Form werden Formeln durch LehrerInnen sprachlich angewendet, interpretiert und kontextualisiert?

Um diese Forschungsfragen zu beantworten, wird Physikunterricht hospitiert und die Sprache der LehrerInnen im Physikunterricht aufgezeichnet. Einen Überblick über die Forschungsmethodik gibt Tabelle 7.1. Die Forschungsfrage soll beantwortet werden, indem die Lehrersprache transkribiert und Aussagen den einzelnen Ebenen des Ebenenmodells zugeordnet werden. Für die Beantwortung der Teilfrage 3 werden Aussagen, die den Ebenen IV und V zugeordnet werden, näher analysiert. Um Inter-

Thema	elektrischer Widerstand
Klassenstufe	8
Schularten	Gymnasium und Mittelschule
hospitierte Stunden	5-10 pro LehrerIn
Stichprobengröße	10 LehrerInnen
Daten	Transkripte Lehrersprache relevanter Unterrichtspassagen
zus. erh. Daten	Notation Unterrichtsgeschehen mit Smartpen leitfadengestützte Interviews mit LehrerInnen Kurzfragebogen für Erhebung von Personenmerkmalen

Tabelle 7.1.: Übersicht über die Forschungsmethodik

pretationen absichern zu können und die Erhebung möglichst transparent zu gestalten, wurden zusätzlich die in Tabelle 7.1 vermerkten zusätzlichen Daten erhoben.

Inhaltlich wurden folgende Rahmenbedingungen festgelegt:

Klassenstufe 8 Hospitiert wurde Unterricht der Klassenstufe 8 in Gymnasien und Mittelschulen. Die Klassenstufe 8 wurde hierbei gewählt, da im sächsischen Lehrplan ab der Klassenstufe 8 ein deutlicher Anstieg im Grad der im Physikunterricht verwendeten Mathematisierung zu erkennen ist. Erstmals werden viele Phänomene quantitativ behandelt und mehrere Formeln eingeführt. Da die SchülerInnen diesen hohen Mathematisierungsgrad aber noch nicht gewohnt sind, ist zu vermuten, dass LehrerInnen hier noch mehr als in höheren Jahrgängen versuchen, die Formeln für SchülerInnen verständlich zu erklären und sie schrittweise an diese Form des physikalischen Wissens und der physikalischen Arbeitsweisen heranzuführen. Dies legt die Vermutung nahe, dass die achte Klassenstufe für diese Erhebung von besonderem Interesse ist, da zum einen viele Formeln vorkommen, diese aber noch stärker erklärungsbedürftig sind.

Thema: elektrischer Widerstand Der sächsische Lehrplan sieht in der Klassenstufe 8 am Gymnasium die Lernbereiche „Mechanik der Flüssigkeiten und Gase“, „Thermische Energie“, „Eigenschaften Elektrischer Bauelemente“ und „Selbstständiges Experimentieren“ zu den Gesetzmäßigkeiten von Widerständen in Reihen- und Parallelschaltungen vor (SMK, 2011). Im Unterricht der Mittelschule werden im Realschul- und im Hauptschulbildungsgang die Lernbereiche „Leitungsvorgänge in Metallen“, „Druck und seine Wirkungen“, „Wärme und Wärmekraftmaschinen“ behandelt (SMK, 2009). Die Themen Mechanik, Thermodynamik und Elektrizitätslehre weisen dabei Unterschiede in der Alltagsnähe ihrer Inhalte und der behandelten physikalischen Modelle auf. Die Elektrizitätslehre gilt

häufig als abstraktes Thema, das wenig greifbar und für SchülerInnen damit schwer verständlich ist (vgl. z. B. Wilhelm und Hopf, 2018). Aus diesem Grund bietet sich die Elektrizitätslehre für eine Untersuchung des sprachlichen Umgangs der LehrerInnen mit Formeln an, da sie gegebenenfalls hier besonders auf Lernschwierigkeiten der SchülerInnen eingehen können.

Formeln: $R = \frac{U}{I}$ und $R = \rho \cdot \frac{l}{A}$ In der Elektrizitätslehre der Klassenstufe 8 wird der elektrische Widerstand als neue physikalische Größe eingeführt. Es werden zwei unterschiedliche Formeln für den elektrischen Widerstand behandelt. Die erste Formel, die eingeführt wird, ist die Definitionsgleichung des Widerstandes $R = \frac{U}{I}$. Die zweite Formel ist das Widerstandsgesetz, das den Widerstand eines langen Drahtes beschreibt, $R = \rho \cdot \frac{l}{A}$. Am Gymnasium sind beide Formeln verpflichtend vom Lehrplan gefordert (vgl. SMK, 2011). Die Formel $R = \frac{U}{I}$ wird sowohl im Realschul- als auch im Hauptschulbildungsgang eingeführt. Für die Realschule wird auch die Berechnung von Widerstand, Spannung und Stromstärke mit Hilfe der Formel explizit gefordert. Im Realschulbildungsgang der Mittelschule soll die Abhängigkeit des Widerstandes eines Leiters von Länge, Querschnittsfläche und Stoff mit einem Schülerexperiment untersucht werden. Es sollen die Proportionalitäten $R \sim l$ und $R \sim \frac{1}{A}$ herausgearbeitet werden. Als Differenzierung wird vorgeschlagen, auch die Formel $R = \rho \cdot \frac{l}{A}$ zu thematisieren. Im Hauptschulbildungsgang der Mittelschule soll die Abhängigkeit des Widerstandes von der Länge, der Querschnittsfläche und dem Stoff eines metallischen Leiters untersucht werden. Für die Abhängigkeit von der Länge und der Querschnittsfläche ist ein Schülerexperiment vorgesehen, es können je-desto-Aussagen getroffen werden. Für die Stoffabhängigkeit wird eine qualitative Behandlung vorgeschlagen. (SMK, 2009)

Der Unterricht an Gymnasien und Mittelschulen unterscheidet sich somit inhaltlich durch den Grad der Mathematisierung. Während am Gymnasium die Formel für das Widerstandsgesetz verpflichtend durch den sächsischen Lehrplan vorgegeben wird, soll der Zusammenhang an Mittelschulen halbquantitativ in Form von je-desto-Aussagen behandelt werden. Ein Vergleich dieser beiden Schulformen ist somit für die Fragestellung, wie LehrerInnen mit unterschiedlichen Formen der Mathematisierung im Physikunterricht für gleiche Inhalte umgehen, interessant.

Aufzeichnung Die Forschungsfragen beziehen sich ausschließlich auf die Sprache der LehrerInnen. Aus diesem Grund ist eine Aufzeichnung der Sprache der

Lehrkraft mit einem Umhängemikrofon ausreichend. Antworten von SchülerInnen sind gegebenenfalls nur inhaltlich relevant, da sie für das Verständnis des Unterrichtsganges notwendig sind. Um eine Erfassung der non-verbalen Handlungen, des allgemeinen Unterrichtsverlaufes und Unterrichtsgeschehens, und eine synchrone Erfassung von Lehrersprache und Tafelanschrieb beziehungsweise Anzeigen auf der interaktiven Tafel zu ermöglichen, wird der Unterricht hospitiert und mit Hilfe eines Smartpens schriftlich mitskizziert. Ein Smartpen ermöglicht eine Tonaufnahme, die mit handschriftlichen Notizen, die digitalisiert werden können, synchronisiert wird. In einem leitfadengestützten Interview und mit Hilfe eines Kurzfragebogens werden die LehrerInnen nach Abschluss der Hospitationen zu Formeln im Allgemeinen und Besonderheiten des hospitierten Unterrichts befragt. Die Interviews geben den LehrerInnen die Möglichkeit, sich zu positionieren und dienen der Forschenden bei unsicheren Interpretationen als Absicherungsmöglichkeit. Eine ausführliche Analyse der Interviews ist kein Ziel dieser Arbeit.

Stichprobengröße Beobachtet wurde der Physikunterricht von insgesamt 10 Physiklehrerinnen und -lehrern. Um ein möglichst großes Spektrum der qualitativen Ergebnisse durch einen kontrastiven Vergleich unterschiedlicher LehrerInnen zu ermöglichen, wurde die Stichprobe möglichst heterogen gestaltet. In der Stichprobe sind vier Gymnasiallehrkräfte und sechs Mittelschullehrkräfte. Es sind LehrerInnen beider Geschlechter vertreten (s. Beschreibung der Stichprobe in Kap.10). Das Alter und die Berufserfahrung differieren zwischen einem Referendaren und einigen LehrerInnen, die sich im Erhebungszeitraum wenige Jahre vor der Pensionierung befanden. Pro Lehrkraft wurden zwischen fünf und elf Unterrichtsstunden hospitiert, je nachdem, wieviel Zeit auf das Thema elektrischer Widerstand verwendet wurde (s. Kap. D.1 im Anhang für eine detaillierte Analyse der hospitierten Unterrichtszeit). Insgesamt wurden 4740 Minuten (=79 Zeitstunden) Unterricht hospitiert und aufgezeichnet und davon 1964 inhaltlich relevante Minuten (=32,7 Zeitstunden) transkribiert. Hierbei wurden beispielsweise Phasen, in denen Schülerexperimente gemacht werden, oder Phasen des Unterrichtsgesprächs, die sich im weiten Sinne nicht auf eine Formel beziehen, nicht transkribiert. Eine detailliertere Darstellung und Analyse der Stichprobe findet sich in Kapitel 10.

8. Vorstudien

Für die Validierung und Weiterentwicklung des aus der Theorie abgeleiteten Ebenenmodells der Versprachlichung von Formeln (s. Kap. 5) und zur Erprobung der Erhebungsmethodik wurden unterschiedliche Vorstudien durchgeführt. Diese und erste Ergebnisse aus diesen Vorstudien werden im Folgenden präsentiert.

8.1. Überprüfung und Adaption des Ebenenmodells

In einigen kleineren Vorstudien wurde untersucht, ob das entwickelte Modell prinzipiell geeignet ist, um das Sprechen über Formeln zu beschreiben. Hierzu wurde zunächst in drei Abschlussarbeiten die Sprache in einer Auswahl an in Sachsen zugelassenen Lehrbüchern mit Hilfe des Modells analysiert. Anschließend wurde das Modell in einer Lehrerfortbildung vorgestellt und diskutiert. Im Anschluss an die Vorstudien wurde das Modell leicht angepasst (s. Kap. 5.3). Die Ergebnisse dieser Vorstudien sollen im Folgenden dargestellt werden.¹

8.1.1. Lehrbuchanalysen

In zwei Masterarbeiten und einer Bachelorarbeit wurde das aus der Theorie entwickelte Ebenenmodell der Versprachlichung von Formeln genutzt, um Texte in Lehrbüchern zu analysieren. Untersucht wurden in Sachsen zugelassene Lehrbücher für das Gymnasium und die Mittelschule für die Klassenstufen 7, 8 und 9. Thematische Schwerpunkte der Lehrbuchanalysen waren die Mechanik und die Elektrizitätslehre. Grundsätzlich zeigt sich das Ebenenmodell als ein geeignetes Instrument, um die Texte bezüglich des sprachlichen Umgangs mit Formeln zu beschreiben. Für die Lehrbuchanalysen wurde die Version des Ebenenmodells, das in Kapitel 5.3.1 in Abbildung 5.4 dargestellt wird, genutzt. Auf die dort beschriebenen Ebenen I-V beziehen sich die folgenden Darstellungen. Die fünf Ebenen konnten in allen drei Arbeiten identifiziert werden. Die Tabelle 8.1 zeigt einige Beispiele aus den Arbeiten.

¹Die Ergebnisse der Vorstudien wurden z. T. in Janßen und Pospiech (2015) und Janßen und Pospiech (2016c) veröffentlicht.

Ebene	Beispiele
I	(1) $\rho = \frac{m}{V}$ (2) $v = \frac{s}{t}$ (3) $s = v \cdot t$ (4) $F = m \cdot a$ (5) $\frac{1}{R_{ges}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$ (6) $F_A = F_2 - F_1$
IIA	(1) Dichte = $\frac{\text{Masse des Körpers}}{\text{Volumen des Körpers}}$ (2) Geschwindigkeit = $\frac{\text{Weg}}{\text{Zeit}}$
IIB	(6) Die Differenz aus F_2 und F_1 ergibt die Auftriebskraft.
III	(4) Die auf einen Körper wirkende Kraft F ist das Produkt aus der Masse m des Körpers und der Beschleunigung a , die er durch die Kraft erhält. (5) [Bei einer Parallelschaltung von Bauelementen] ist der Kehrwert des Gesamt widerstandes gleich der Summe der Kehrwerte der Einzelwiderstände.
IV	(1) Hat ein Körper ein anderes Volumen als ein Kubikzentimeter, so braucht man nur die Masse für einen Kubikzentimeter ausrechnen [...]. Aus der Masse, die ein Kubikzentimeter eines Stoffes besitzt, kann man leicht erkennen, wie groß die Dichte dieses Stoffes ist. (2) Man kann die Geschwindigkeit eines Körpers berechnen, indem man den Quotienten aus dem zurückgelegten Weg und der benötigten Zeit bildet. (3) Das Gesetz gibt an, wie groß der Weg s ist, der in der Zeit t zurückgelegt wird.
V	(1) Der Müllwagen soll auf einer Fahrt möglichst viel Müll transportieren [...]. Das wird dadurch ermöglicht, dass der Müll zusammengepresst wird. Seine einzelnen Bestandteile liegen dann enger beisammen. (2) Ihr steht an der Haltestelle und wartet auf den Bus. Euch fällt auf: Die Menschen im Verkehr bewegen sich unterschiedlich schnell. Die Fußgänger gehen langsam, die Radfahrer fahren schnell. Noch schneller bewegen sich die Autos. (4) Von zwei Schwimmerinnen mit gleich großer Absprungkraft wird diejenige weniger beschleunigt, die eine größere Masse hat.

Tabelle 8.1.: Beispiele für die Ebenen des Ebenenmodells aus Lehrbuchanalysen, entnommen aus den Abschlussarbeiten von Baumgarten (2014), Haase (2015), Hauspurg (2015), Rothe (2014)

Wie bereits in Kapitel 5.3 beschrieben wurde, war die Ebene IIB im ursprünglichen

Modell nicht vorgesehen und wurde während der Analysen ergänzt. Die der Ebene IV zugeordneten Aussagen sind sehr nah an der Fachsprache und ergänzen die explizit genannte Formel meist nur um eine Ergänzung wie „Man kann berechnen, indem...“ (Beispiel (2)) oder „Das Gesetz gibt an,...“ (Beispiel (3)). Auf diese Weise wird die Formel implizit erkenntnistheoretisch klassifiziert, im Beispiel (2) als Berechnungsvorschrift, in (3) als Gesetz.

Wie Tabelle 8.1 zeigt, konnten im Bereich der Dichte und Mechanik auf Ebene V gute Beispiele für sehr alltagsnahe Aussagen gefunden werden. Aus diesem Grund wurde aus der Vorstudie noch nicht die Notwendigkeit erkannt, die Ebene IV weiter auszudifferenzieren und eine VI. Ebene für alltagsnahe Äußerungen zu ergänzen. Dies lässt die Vermutung zu, dass themenbedingt unterschiedliche Ebenen unterschiedlich stark ausgeprägt sind. Insbesondere in der Mechanik gibt es für viele Gleichungen sehr alltagsnahe Anwendungen und Beispiele, die SchülerInnen haben viele Vorerfahrungen zur Geschwindigkeit, die hier aufgegriffen werden können. In der Hauptstudie wird sich hier ein anderes Bild zeigen, weshalb im Rahmen der Hauptstudie das Modell nochmals angepasst werden musste (s. Kap. 5.3). Im Rahmen der genaueren Beschreibung und Ausdifferenzierung der Ebenen würde nachträglich das Beispiel (4) von Ebene V zu IV umsortiert werden. Bei diesem Beispiel wird zwar eine alltagsnahe Anwendung der Formel beschrieben, diese wird aber mit Hilfe der physikalischen Größen und ihrer halbquantitativen Zusammenhänge analysiert. Die Aussage ist somit sprachlich zumindest als Unterrichtssprachlich, mathematisch als halbquantitativ zu verorten und damit zu Ebene IV zugehörig.

Neben diesen grundsätzlichen Erkenntnissen, zeigten sich folgende Besonderheiten:

- In einigen Lehrbüchern wird Ebene IIA (Wortformel) nicht genutzt.
- Ebene IIB (Formelsatz) kann einmal gefunden werden. Bei dem gefundenen Beispiel handelt es sich um eine Mischform aus IIB und III, da die Auftriebskraft nicht mit F_A bezeichnet, sondern in die Fachsprache übersetzt wurde (s. Beispiel in Tab. 8.1).
- Ebene III (fachsprachliche Übersetzung) wird nur selten identifiziert. Viele Aussagen, die in III eingeordnet werden könnten, sind um zusätzliche Informationen, wie Gültigkeitsbedingungen oder einrahmende Theorie, ergänzt und werden daher eher in Ebene IV eingeordnet. Hieraus wird für die Haupterhebung die Notwendigkeit abgeleitet, Doppelcodierungen zuzulassen, um das gefundene Material vollständig abbilden zu können.
- In einigen Lehrbüchern ist das Verhältnis von Formeln und natürlichsprachlichen

Darstellungen in etwa ausgewogen. Dies zeigt sich in Lehrbuchanalysen der Mittelschule und des Gymnasiums für die Klassenstufen 7 und 8 zum Thema Elektrizitätslehre. (Rothe, 2014)

- Die Untersuchung zur Mechanik in Klassenstufe 9 kommt für ein anderes Lehrbuch zu einem gegenteiligen Ergebnis. Hier werden sehr viele Formeln eingeführt und es können nur sehr wenige Versprachlichungen identifiziert werden. Die Tabelle 8.2 zeigt einen Überblick hierzu. (Haase, 2015)
- Bei Ebene III und IV werden häufig Formelzeichen in Kombination mit Fachtermini genutzt: „Bei Wärmezufuhr werden Volumen V und Temperatur T größer“ oder „Je größer die Spannung U der Elektrizitätsquelle ist, umso größer ist die Stromstärke I im Stromkreis.“
- Einige Versprachlichungen finden sich, ohne dass die zugehörige Formel behandelt wird. Ein Beispiel ist die folgende Aussage: „Je größer die Anzahl der Elektronen ist, die sich in einer bestimmten Zeit durch den Leiter bewegen, umso größer ist die Stromstärke.“
- In einigen Lehrbüchern werden einzelne Ebenen explizit miteinander verknüpft: „ $p = \frac{F}{A} \rightarrow$ Er [der Druck] ist umso größer, je größer die wirkende Kraft ist und je kleiner die Fläche ist, auf die die Kraft wirkt.“ (Hauspurg, 2015)

Formel, Einheit	Ebene					
	I	IIA	IIB	III	IV	V
$s = v \cdot t$	✓	X	X	✓	✓	X
$\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t}$	✓	X	X	X	✓	✓
$v = a \cdot t$	✓	X	X	X	✓	✓
$\bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t}$	✓	X	X	X	✓	✓
$s = \frac{1}{2}a \cdot t^2$	✓	X	X	X	✓	X
$F = m \cdot A$	✓	X	X	✓	✓	✓
$[\frac{m}{s^2}]$	✓	X	X	X	✓	✓

Tabelle 8.2.: Identifizierte Ebenen im Lehrbuch Cornelsen Volk und Wissen Physik Plus Klassenstufe 9, Thema Mechanik, adaptiert aus Haase (2015, S. 63)

Die Lehrbuchanalysen zeigen somit, dass sich grundsätzlich alle Ebenen in Lehrbüchern identifizieren lassen. Einige Aussagen können nicht eindeutig einer Ebene

zugeordnet werden, da beispielsweise die Ebenen III und IV häufig in Kombination auftauchen. Daher sollten in der Hauptstudie Doppelcodierungen zu mehreren Ebenen zugelassen werden.

8.1.2. Explorative Lehrerbefragungen

In einer Lehrerfortbildung mit 25 LehrerInnen wurde das Ebenenmodell mit einem Beispiel vorgestellt. Im Anschluss sollten die LehrerInnen in Partnerarbeit eine Beispielformel auf allen Ebenen versprachlichen. Die Ergebnisse wurden diskutiert und die LehrerInnen nach möglichen Schwierigkeiten und Problemen bei der Aufgabe befragt. Es stellte sich heraus, dass die LehrerInnen das Modell grundsätzlich für geeignet halten, um sich bewusst zu machen, welche Inhalte mit einer Formel verknüpft werden und einige Möglichkeiten aufzuzeigen, wie sie SchülerInnen dies sprachlich vermitteln können.

12 Ergebnisse aus der Partnerarbeit beschäftigten sich mit der Formel für den Widerstand eines langen Drahtes. Darum soll beispielhaft die Versprachlichung der LehrerInnen für diese Formel dargestellt werden. Auf allen Ebenen zeigte sich bereits bei dieser sehr kleinen Stichprobe eine große Variationsbreite in den Ergebnissen. Beispiele für alle Ebenen sind in Tabelle 8.3 dargestellt.

Ebene	Beispiele
I	$R = \varrho \cdot \frac{l}{A}$ $R = \varrho \frac{l}{A}$ $R = \frac{\varrho \cdot l}{A}$
IIA	Aufteilung der Brüche wie in I elektrischer Widerstand = spezifischer elektrischer Widerstand $\cdot$ $\frac{\text{Länge}}{\text{Querschnitt}}$ Widerstand = spez. el. W. $\cdot \frac{\text{Länge}}{\text{Fläche}}$
IIB	„R ist Produkt aus ϱ und Quotient aus l und A .“ „R ist ϱ multipliziert mit l und dividiert durch A .“ „R ist ϱ mal l durch A .“

Ebene	Beispiele
III	„Elektrischer Widerstand ist das Produkt aus dem spezifischen elektrischen Widerstand und dem Quotienten von Länge und Querschnittsfläche.“ „Der Widerstand entspricht dem spezifischen elektrischen Widerstand multipliziert mit dem Quotienten aus Länge und Querschnitt.“ „Der Widerstand entspricht dem spezifischen elektrischen Widerstand multipliziert mit dem Quotienten aus Länge und Querschnitt.“
IV	„Der elektr. Widerstand hängt ab vom Material, der Länge und dem Querschnitt (Dicke) des elektrischen Leiters.“ „Der Widerstand ist vom Material abhängig.“ „Je länger der Widerstand umso größer der Ohmsche Widerstand.“ „Widerstand ist proportional zu spezifischem elektrischen Widerstand.“ „Man kann den elektrischen Widerstand eines Drahtes berechnen, indem man ϱ des Drahtmaterials mit Länge multipliziert und durch Querschnittsfläche dividiert.“
V	„Der elektrische Widerstand eines Drahtes ist ein Maß dafür, wie stark der Stromfluß behindert wird. Er ist vom Material abhängig und umso größer, je länger und je dünner der Draht ist.“ „Je länger ein Kabel und je dünner es ist, umso mehr wird der Stromfluss behindert. Der Widerstand eines Drahtes hängt vom Materiallänge und Querschnitt ab.“

Tabelle 8.3.: Versprachlichungen von $R = \varrho \cdot \frac{l}{A}$ durch TeilnehmerInnen einer Lehrerfortbildung (Rechtschreibung übernommen)

Bei Ebene II und III fällt auf, dass viele LehrerInnen einen Nominalstil (Verwendung von Substantiven anstelle von möglichen Verben) verwenden. Bei Ebene IIB drücken sich 4 LehrerInnen nominal aus („ R ist Produkt aus ϱ und dem Quotienten aus l und A .“), weitere 4 Lehrer nutzen einen fachsprachlichen Verbalstil („ R ist ϱ multipliziert mit l und dividiert durch A .“) und 3 Lehrer nutzen eine Notation, die eher in der Unterrichtssprache verortet werden kann („ R ist ϱ mal l durch A .“).

Auf Ebene IV wurden 16 Versprachlichungen, die LehrerInnen unter V notiert hatten, nachträglich einsortiert. Die LehrerInnen fokussieren vorrangig mathematische

Implikationen der Formel, zum Beispiel je-desto-Aussagen. Je-desto-Aussagen finden sich bei 6 LehrerInnen. Weitere 2 LehrerInnen formulieren Sätze mit Proportionalitäten. 9 LehrerInnen verwenden allgemein die Formulierung, der Widerstand hänge von ρ , l und A ab. Bei 6 LehrerInnen wird die Formel indirekt als Berechnungsvorschrift gewertet, indem sie übersetzt wird mit „Man kann den Widerstand berechnen, indem man...“ Die bei dieser kleinen Stichprobe sichtbare Fokussierung auf mathematische Implikationen und die Klassifizierung als Berechnungsvorschrift decken sich mit den fachdidaktischen Erkenntnissen, dass im Unterricht häufig die technische Rolle von Mathematisierungen gegenüber einer möglichen strukturellen Rolle (n. Pietrocola, 2008) überwiegt (s. Kap. 3.2). Aufgrund der Stichprobengröße und auch dem geringen zeitlichen und inhaltlichen Umfang, in denen mit den LehrerInnen diskutiert wurde, kann sie allerdings nur als erster Hinweis gedeutet werden. Der Vergleich von technischen und strukturellen Aspekten wird in der Hauptstudie vertieft (s. Kap. 15).

Alle LehrerInnen notierten etwas in Ebene V, bis auf 2 Eintragungen wurden jedoch alle nachträglich in die Ebene IV einsortiert. Die zwei Beispiele, die in V eingeordnet wurden, erhalten neben den direkt aus der Formel ablesbaren Informationen eine Interpretation des Widerstandes als Maß für die Behinderung des Stromflusses. Sprachlich sind diese Beispiele nicht in die Alltagssprache der SchülerInnen einzuordnen. Es zeigt sich, dass mit den bisherigen Informationen die Ebenen IV und V nur schwer zu unterscheiden sind und hier in der Hauptstudie aus dem Material heraus induktiv weitere Unterscheidungskriterien gefunden werden müssen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich eine überraschend große Variationsbreite in den Antworten zeigt. Dies gilt auch für die Ebenen I-III, in denen unterschiedliche Notationen und Formulierungen der mathematischen Operationen zu finden sind. Gleichzeitig lässt sich das Material innerhalb einzelner Ebenen bereits ansatzweise zu einzelnen Kategorien zusammenfassen. Dies deutet darauf hin, dass die genauere Untersuchung der Versprachlichungen innerhalb einer Ebene mit Hilfe von Unterrichtsaufzeichnungen interessant sein kann. Auffallend ist, dass die LehrerInnen häufig fachsprachliche Ausdrücke nutzen. Dies kann an der dem Unterricht entkoppelten Situation liegen, in der sie nicht die Notwendigkeit sehen, sich schülerfreundlich auszudrücken. Da nur 2 LehrerInnen Ergebnisse aufzeigten, die tatsächlich in Ebene V einzuordnen sind, scheint den LehrerInnen der Unterschied zwischen den Ebenen IV und V noch nicht deutlich genug gewesen zu sein. Dies kann zum einen daran liegen, dass eine Übertragung, Interpretation oder Analogiebildung in Alltagssituationen deutlich schwieriger ist als die reine Übersetzungstätigkeit, die in Ebene II und III nötig ist. Hieraus ließe sich eine Notwendigkeit ableiten, für diese Ebenen stärker zu sensibilisieren und LehrerInnen Handlungsmöglichkeiten aufzuzeigen. Vorsichtig ge-

sagt, lässt sich aus diesen Ergebnissen eine erste Tendenz erkennen, dass LehrerInnen die Verknüpfung einer Formel mit Anwendungen oder die physikalische Interpretation einer Formel schwerer fällt, als das Ziehen rein mathematischer Konsequenzen. In der Hauptstudie soll daher untersucht werden, ob sich dieser Eindruck auch dort widerspiegelt. Zum anderen könnte dieses Ergebnis aber auch auf mangelnde Erklärung dieser Ebenen zurückgeführt werden. Die Ebenen IV und V sollten also in der Hauptstudie deutlicher voneinander unterschieden werden. In Konsequenz wurden die Ebenen im Laufe der Hauptstudie weiter ausdifferenziert und um die Ebene VI ergänzt, sodass eine eindeutige Zuordnung von Aussagen zu den einzelnen Ebenen möglich ist (s. Kap. 5.3).

8.1.3. Konsequenzen aus den Vorstudien für die Hauptstudie

Zusammenfassend hat sich das Ebenenmodell grundsätzlich als ein geeignetes Instrument erwiesen, um den sprachlichen Umgang mit Formeln zu beschreiben. Innerhalb der identifizierten Ebenen zeigte sich eine gewisse Variationsbreite, die eine induktive Kategorisierung bei größerer Datenmenge vielversprechend erscheinen lässt.

In der Lehrerfortbildung zeigte sich eine Fokussierung auf mathematische Aspekte einer Formel. Aus diesem Grund scheint es für die Hauptstudie interessant, das Verhältnis von rein mathematischen (technischen) und mathematisch-physikalischen (strukturellen) Aussagen näher zu beleuchten (s. Kap. 15).

Die Ebenen I-III sind eindeutig zu identifizieren und auch für die befragten LehrerInnen gut nachvollziehbar. Die Ebenen IV und V sind in den Vorstudien noch nicht trennscharf aus dem Material abzubilden. Sie bedürfen daher einer näheren Ausdifferenzierung und Beschreibung durch eine induktive Kategorienbildung am Datenmaterial.

8.2. Pilotierung der Erhebungsinstrumente

Die verwendeten Erhebungsinstrumente wurden in einer Pilotstudie getestet. Hierzu zählt ein allgemeiner Test der Aufnahmeverfahren in mehreren Unterrichtsstunden eines Lehrers. Auf Grundlagen dieser Testaufnahmen wurde der Leitfaden für Unterrichtsaufzeichnungen erstellt, der zum einen technische Hinweise, aber auch Hinweise an den Beobachtenden bezüglich zu notierender Unterrichtsgeschehnisse enthält (s. Anhang A.2). Bei den Unterrichtsbesuchen stellte sich schnell heraus, dass eine reine Tonaufnahme der Lehrersprache in vielen Fällen nicht ausreicht, um den Unterrichtsgang nachträglich nachvollziehen zu können. Aus diesem Grund wurden

in der Hauptstudie mit Hilfe eines Smartpens der Unterrichtsverlauf und die Tafelbilder notiert. Die Hospitationen in der Pilotierung wurden ausschließlich durch die Forschende selbst durchgeführt. Die Hospitationen in der Hauptstudie wurden in wenigen Ausnahmefällen auch von geschulten ForscherInnen durchgeführt.

9. Auswertungsmethodik

Im Folgenden soll die verfolgte Methodik zur Datenauswertung beschrieben werden. Dies umfasst die Transkription der Unterrichtsmitschnitte, die Entwicklung des Kategoriensystems und die Analyse der Ergebnisse der Kategorisierung. Da es sich bei dieser Arbeit um eine qualitative Forschungsarbeit handelt, ist die gründliche Dokumentation des methodischen Vorgehens ein wichtiger Punkt für die Nachvollziehbarkeit und Validität der erhaltenen Ergebnisse (s. auch die Diskussion der Gütekriterien in Kap. 11).

9.1. Transkription

Um die Lehrersprache auswerten zu können, wurden zunächst relevante Unterrichtspassagen anhand der Unterrichtsmitschriften markiert. Als relevant wurden alle Passagen eingestuft, in denen im weitesten Sinne mit einer Formel gearbeitet oder über den Inhalt, den sie beschreibt, gesprochen wurde. Anschließend wurden die entsprechenden Stellen mit Hilfe eines einfachen Transkriptionssystems (s. Transkriptionsregeln im Anhang A.4) transkribiert. Die Transkription der Unterrichtsstunden erfolgte zum Teil durch die Autorin selbst, der Großteil der Unterrichtstranskripte wurde durch geschulte studentische Hilfskräfte übernommen.

9.2. Entwicklung des Kategoriensystems

Die Transkripte wurden mit Hilfe der Qualitativen Inhaltsanalyse in leicht adaptierter Form nach Kuckartz (2016), computerunterstützt mit Hilfe der Analysesoftware MAXQDA 11 für Mac analysiert. Es werden folgende Begriffe verwendet:

Kategorie: Eine Kategorie fasst Einzelaussagen aufgrund gemeinsamer abstrahierter Eigenschaften zu einer Klasse zusammen. Die Kategorien unterschieden sich dabei in der Art der Eigenschaften, die sie repräsentieren. Eine Kategorie wird durch eine Kategoriendefinition charakterisiert, die den Namen der Kategorie, eine inhaltliche Beschreibung und ein Ankerbeispiel enthält. Für diese Arbeit

relevant sind thematische Kategorien und analytische Kategorien. Thematische Kategorien sammeln Aussagen zu einem Thema. Analytische Kategorien gehen über die rein inhaltliche Beschreibung des Materials hinaus, analysieren das Material weitergehend und fassen Aussagen zu abstrakteren Kategorien zusammen, die sich aus der intensiven Beschäftigung mit dem Material ergeben. (Vgl. Kuckartz, 2016, S. 34) Die Kategorien sind außerdem zu einem Teil deduktiv aus der Theorie und zu einem anderen Teil induktiv aus dem Material heraus erarbeitet.

Kategoriensystem: Das Kategoriensystem bezeichnet die Gesamtheit der Kategorien, die unter dem Fokus der Forschungsfrage für die Beschreibung des Materials relevant sind, und ihre Ordnung zueinander. Ein hierarchisches Kategoriensystem unterscheidet dabei in Hauptkategorien und Subkategorien. Mehrere Subkategorien werden dabei inhaltlich zu einer Hauptkategorie zusammengefasst. Diese hierarchische Ordnung bewertet dabei nicht die Wichtigkeit der Einzelkategorien für die Beschreibung des Materials. (Vgl. Kuckartz, 2016, S. 38 f.)

Codiereinheit: Die Codiereinheit bezeichnet ein Textsegment, das einer Kategorie zugeordnet, oder aus der eine Kategorie abstrahiert werden kann. In einigen Fällen ist es sinnvoll, eine minimale und maximale Länge der Codiereinheit festzulegen. (Vgl. Kuckartz, 2016, S. 41 ff.)

Kontexteinheit Die Kontexteinheit bezeichnet die größte Texteinheit, die hinzugezogen werden darf, um eine Codiereinheit richtig zu kategorisieren. (Vgl. Kuckartz, 2016, S. 44)

Coding Als Coding bezeichnet man eine einzelne Textstelle, die einer Kategorie zugeordnet wurde.

Codieren/Codierer: Der Prozess des Identifizierens und Zuordnens von Textstellen aus dem Material zu bestehenden Kategorien wird codieren genannt. Die Person, die codiert, wird als Codierer bezeichnet. (Vgl. Kuckartz, 2016, S. 44)

Codierleitfaden: Der Codierleitfaden stellt eine Art Handbuch für das Codieren dar. Er fasst das Kategoriensystem zusammen, beinhaltet alle Kategoriendefinitionen mit zusätzlichen optionalen Angaben zu den einzelnen Kategorien, wie etwa Signalwörter oder Grenzfälle und enthält zusätzliche Hinweise für den Codierer. Kuckartz (2016) spricht in diesem Zusammenhang auch von Kategorienhandbuch. Da das Handbuch aber vor allem für den Prozess des Codierens, weniger für das Generieren von Kategorien dient, wird in dieser Arbeit der Begriff Codierleitfaden verwendet.

Es wurde keine feste Codiereinheit festgelegt, vielmehr wurde in Rückbezug auf Kuckartz (2016, S. 43) die Länge der Codiereinheit nach der Länge der jeweiligen Sinneinheit verstanden. Dadurch sind innerhalb der Codierungen Überlappungen und Verschachtelungen, sowie Doppelcodierungen möglich. Die Kontexteinheit, in der eine Codiereinheit interpretiert wird, richtet sich nach den einzelnen Unterrichtsstunden der Lehrkräfte. Die maximale Kontexteinheit, die für das Verständnis der Codiereinheit relevant ist, ist somit das gesamte Transskript der Stunde.

Es wurden sowohl deduktive (apriori aus der Theorie entwickelte) als auch induktive (am Material entwickelte) Kategorien erstellt. Die Kategorien unterscheiden sich nach Kuckartz (2016, S. 34) in thematische Kategorien (Aussagen zu einem Thema) und analytische Kategorien. Letztere sind Resultat intensiverer Auseinandersetzung mit dem Material. Analytische Kategorien sind nicht im Sinne einer reinen Beschreibung direkt aus den Aussagen erkennbar, sondern liegen häufig implizit vor und sind somit Teil der Interpretation der Daten. Folgende Kategorienarten tauchen im Kategoriensystem auf:

- Deduktiv gebildete thematische Kategorien: Jede Formel erhält zunächst eine übergeordnete Kategorie, sodass alle Aussagen zur Formel $R = \frac{U}{I}$ eine Kategorie bilden, eine andere die zur Formel $R = \varrho \cdot \frac{l}{A}$, eine dritte Aussagen zum Ohmschen Gesetz $I \sim U$.
- Deduktiv gebildete Kategorien anhand des theoretisch entwickelten Ebenenmodells: Das durch die Lehrbuchanalysen pilotierte Ebenenmodell (s. Kap. 5 und 8.1) liefert deduktiv analytische Hauptkategorien, die den einzelnen Ebenen entsprechen. Die Ebenen I bis III orientieren sich dabei an Oberflächenmerkmalen der Aussagen (welche Art von Zeichen werden genutzt). Die Ebenen IV bis VI haben einen stärkeren analytischen und auch einen evaluativen Charakter, da die Sprachebene (Alltagssprache, Unterrichtssprache oder Fachsprache) beurteilt und eingeordnet werden muss. Außerdem erhalten die Ebenen IV bis VI viele Aussagen, bei denen die Verknüpfung zur Formel nicht explizit kommuniziert wird, sondern implizit vorhanden ist. Die Identifikation solcher Aussagen verlangt somit eine intensivere Auseinandersetzung mit Theorie und Datenmaterial.
- Induktiv gebildete analytische Kategorien: Zu den Hauptkategorien werden am Material (Sub-)kategorien entwickelt.

Die induktiv gefundenen Subkategorien wurden anschließend entlang dreier großer inhaltlicher Kategorien strukturiert und geordnet, um eine Identifizierung der Katego-

rien am Text zu vereinfachen. Diese Oberkategorien sind *Formel wird gesprochen*, *Formel wird angewendet oder interpretiert* und *Über Formel wird gesprochen*. Somit sind die Kategorien zwar aus dem Ebenenmodell heraus entstanden, werden aber zunächst losgelöst vom Modell dargestellt. Anschließend wird das Modell zur näheren Beschreibung und Analyse der Ergebnisse wieder herangezogen (s. Kap. 13).

Das durchlaufene Ablaufschema entspricht in leicht veränderter Form der inhaltlich strukturierenden Inhaltsanalyse, wie sie von Kuckartz (2016, S. 100) beschrieben wird. Kuckartz (2016) sieht dabei folgende Schritte vor:

1. Initiierende Textarbeit: Markieren wichtiger Textstellen, Schreiben von Memos.
2. Entwickeln von thematischen Hauptkategorien
3. Codieren des gesamten Materials mit den Hauptkategorien
4. Zusammenstellen aller mit der gleichen Hauptkategorie codierten Textstellen
5. Induktives Bestimmen von Subkategorien am Material
6. Codieren des kompletten Materials mit dem ausdifferenzierten Kategoriensystem (mit Rückwirkung auf 4.)
7. Einfache und komplexe Analysen, Visualisierungen

Der tatsächlich erfolgte Analyseprozess ist in Abbildung 9.1 dargestellt. Zunächst wurden bis Schritt 4 die Transkripte von sechs LehrerInnen zur Formel $R = \frac{U}{I}$ codiert. Hier wurden zunächst die Einführungsstunden zum elektrischen Widerstand mit jeweils ein bis zwei Folgestunden, in der Regel bis zum Beginn der anschließenden Erarbeitung des Widerstandsgesetzes, berücksichtigt. Daraus wurde ein vorläufiges Kategoriensystem und ein Codierleitfaden erstellt. Dieser wurde anschließend auf das restliche Datenmaterial zur Formel $R = \frac{U}{I}$ angewendet und überarbeitet. Aus dem Codierleitfaden für die Formel $R = \frac{U}{I}$ wurden allgemeine Kategoriendefinitionen abgeleitet, die auf andere Formeln übertragbar sind (s. Anhang B.1). Dieser Codierleitfaden wurde genutzt, um die restlichen Stunden zu codieren. Das Codieren und die Entwicklung des Codierleitfadens verliefen dabei nicht linear, sondern einzelne Schritte beeinflussten sich wechselseitig. Das Kategoriensystem und der Codierleitfaden wurden während des Arbeitsprozesses stetig verändert und präzisiert. Nach der Codierung des gesamten Datenmaterials wurde ein Teil des Materials von einer InterCoderin codiert, Abweichungen wurden diskutiert und der Codierleitfaden in Rücksprache mit der InterCoderin stellenweise weiter präzisiert und verbessert.

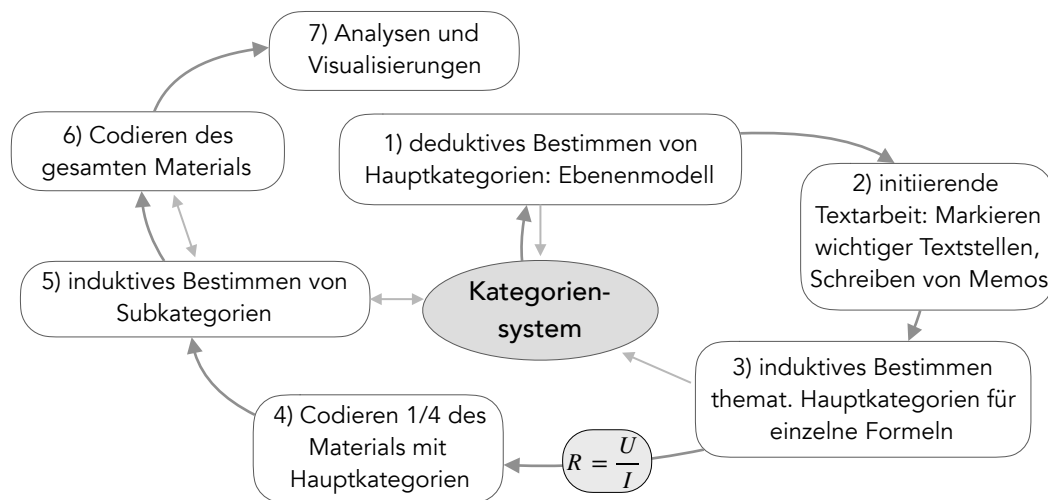


Abbildung 9.1.: Ablaufschema der angepassten inhaltlich strukturierenden Inhaltsanalyse, adaptiert nach Kuckartz (2016, S. 100)

Das Kategoriensystem stellt somit zum einen ein Analyseinstrument dar, da es aus der Theorie abgeleitete grobe deduktive Kategorien bereitstellt, mit denen das Material analysiert wurde. Die induktiven Kategorien und die unterschiedlichen Ausprägungen der Kategorien sind zum anderen zentrales Forschungsergebnis dieser Arbeit und werden in Kapitel 12 beschrieben.

9.3. Analysen und Visualisierungen

Die durch die qualitative Inhaltsanalyse entstandenen Kategorien werden zu Beginn des Ergebnis-Kapitels zunächst inhaltlich und in Bezug auf ihre Häufigkeit beschrieben. Die Beschreibungen sind analog zur Hierarchie des Kategoriensystems strukturiert. Sie gehen immer von der obersten Gliederungsebene aus und differenzieren sich dann in die jeweiligen Unterkategorien aus. Die Ausprägungen der Kategorien beziehen sich immer auf zwei Variablen: die unterschiedlichen Formeln und den unterschiedlichen LehrerInnen. Für jede Kategorie wird also beschrieben, wie ihre inhaltliche Ausprägung für die drei untersuchten Formeln $I \sim U$, $R = \frac{U}{I}$ und $R = \varrho \cdot \frac{I}{A}$ aussieht und ob es Auffälligkeiten bei den unterschiedlichen LehrerInnen gibt.

Die erfolgten quantitativen Auswertungen der Kategoriehäufigkeiten dienen der Veranschaulichung der derzeitigen Relevanz im beobachteten Unterricht und erlauben aufgrund der kleinen und nicht-repräsentativen Stichprobe keine allgemeingültigen statistischen Aussagen. Außerdem ist beim Vergleich verschiedener LehrerInnen

zu beachten, dass unterschiedlich viel Unterrichtszeit hospitiert wurde (5-10 Unterrichtsstunden) und innerhalb des hospitierten Unterrichts auch unterschiedlich viel Zeit transkribiert wurde (123-327 Minuten) (s. Tab. D.1 im Anhang). Dies kann zum Beispiel auf unterschiedliche Unterrichtsmethoden zurückgeführt werden. So wurden beispielsweise Schülerexperimentierphasen nicht transkribiert, da der Fokus dieser Untersuchung auf der Lehrersprache liegt und die LehrerInnen in diesen Phasen nur zu einzelnen SchülerInnen sprechen. Insbesondere die transkribierte Unterrichtszeit beeinflusst in dieser Erhebung die absolute Anzahl der Codings pro LehrerIn, die in Diagramm D.2 im Anhang dargestellt ist und zwischen 157 und 431 liegt. Vor diesem Hintergrund ist der Vergleich der Häufigkeiten von Codings zwischen unterschiedlichen LehrerInnen mit Vorsicht zu interpretieren. Aus diesen Gründen wird in den dargestellten Balkendiagrammen auf die Angabe der absoluten Häufigkeiten verzichtet. Die Balkendiagramme dienen einer Größenabschätzung. Da die Häufigkeiten dennoch einen Anhaltspunkt dafür bieten, welche Relevanz LehrerInnen durch mündliches Beschreiben und Tafelanschriften einzelnen Aspekten beim Sprechen über Formeln beimessen und bei allen LehrerInnen nahezu der gesamte Unterricht zum Thema elektrischer Widerstand hospitiert wurde¹, sind Häufigkeiten dennoch ein geeignetes Instrument, um die Rolle der unterschiedlichen Kategorien im jeweiligen Unterricht abschätzen zu können und durch Vergleiche sehr häufig und sehr selten auftretender Kategorien eine Abschätzung machen zu können, worauf die LehrerInnen der Stichprobe besonderen Wert zu legen scheinen.

In einigen Kategorien werden zur Veranschaulichung der inhaltlichen Ausprägung der Kategorie Wortwolken genutzt. Diese stellen die Häufigkeit der vorkommenden Wörter in den Codierungen einer Kategorie durch unterschiedliche Größe der Wörter dar. Die Wortwolken wurden mit Hilfe von MAXQDA 11 für Mac erstellt. Dabei wurden sogenannte „Stopp-Listen“ genutzt, die hierauf verzeichnete Wörter aus der Analyse ausschließen. Ausgeschlossene Wörter waren zum einen Artikel, Pronomen, Präpositionen, Konjunktionen und Interjektionen. Zum anderen wurden auch inhaltlich nicht relevante Wörter ausgeschlossen (z. B. „Schüler“, „Lehrer“).

Zur Beschreibung der Kategorien werden Zitate genutzt. Die Auswahl der Zitate erfolgt nach Repräsentativität für die jeweilige Kategorie. Es werden aber auch Zitate aufgeführt, die einzelne Aspekte hervorheben oder Grenzfälle darstellen. Zum Teil sind die Zitate im Fließtext verkürzt, wobei Auslassungen durch [...] gekennzeichnet werden. Einige Zitate werden für ein besseres Verständnis und eine erhöhte Nachvollziehbarkeit im Anhang in einem größeren Kontext eingebettet dargestellt.

¹Einige Stunden konnten aus organisatorischen Gründen nicht hospitiert werden, vgl. hierzu Tabelle D.1 im Anhang und die zugehörige Beschreibung der fehlenden Inhalte.

10. Beschreibung der Stichprobe

Die Stichprobe umfasst 10 LehrerInnen. Um ein möglichst breites Spektrum abzubilden in der Art und Weise, wie mit den betreffenden Formeln umgegangen wird, wurde bei der Wahl der Stichprobe vor allem darauf Wert gelegt, sehr unterschiedliche LehrerInnen zu untersuchen. Auf diese Weise kann mithilfe eines kontrastiven Vergleichs gearbeitet werden. So gibt es in unterschiedlichen demografischen Merkmalen eine breite Streuung. Eine Übersicht über die erhobenen Merkmale findet sich in Tabelle 10.1.¹

Alter und Berufserfahrung: Das Alter der LehrerInnen schwankt zum Erhebungszeitpunkt zwischen 29 und 61 Jahren. Unter der Stichprobe befindet sich ein Referendar mit wenig Unterrichtspraxis, aber hohen fachlichen mathematischen Kenntnissen, da er mehrere Jahre als Mathematiker arbeitete. Am anderen Ende des Spektrums steht ein Lehrer mit einem Alter von 58 Jahren und 34 Jahren Berufserfahrung. Es gibt aber auch einen Lehrer mittleren Alters (46 Jahre) mit nur wenig Berufserfahrung (5 Jahre). Auffallend ist, dass es drei sehr junge Lehrer gibt und sechs LehrerInnen, die älter als 50 Jahre sind und somit schon sehr viel Praxiserfahrung haben. In der Stichprobe ist niemand mittleren Alters mit 10-25 Jahren Berufserfahrung.

Mathematik als Zweitfach: Da es sich bei Formeln um mathematische Beschreibungen handelt, ist anzunehmen, dass das mathematische Wissen und Interesse eines Lehrers oder einer Lehrerin darauf Einfluss haben könnten, wie sie mit Formeln im Physikunterricht umgehen und wie sie diese vermitteln. Aus diesem Grund ist es wichtig, dass sowohl LehrerInnen mit als auch ohne Mathematik als Zweitfach in der Stichprobe vertreten sind. Dies beruht auf der Annahme, dass LehrerInnen, die Mathematik als Zweitfach unterrichten, gute mathematische Kenntnisse und Fähigkeiten und eine positive Beziehung zum Fach haben. Der Großteil der untersuchten LehrerInnen unterrichtet ebenfalls Mathematik. Alle in der Stichprobe enthaltenen Mathematik-LehrerInnen haben zudem Mathematik auch als Fach studiert. Unter den untersuchten LehrerInnen befindet sich aber auch ein Lehrer mit einem nicht-

¹Die in der Tabelle aufgeführten Alias-Namen der LehrerInnen sind frei erfunden. Eine Zuordnung der Namen zu den Pseudonymen, die sich auch in den Bezeichnungen der einzelnen Transkripte wiederfinden, ist im Anhang A.1 zu finden.

naturwissenschaftlichen Zweitfach, sowie ein weiterer Lehrer, der nicht Mathematik (aber ein technisches Zweitfach) unterrichtet.

Physikstunden: Die LehrerInnen unterrichten zum Zeitpunkt der Erhebung zwischen 6 und 18 Wochenstunden Physik. Da Physik in Sachsen zweistündig unterrichtet wird, haben somit alle LehrerInnen mindestens drei Klassen in Physik. Die Hälfte der Stichprobe unterrichtet über die Hälfte ihres Lehrdeputats in Physik (davon ein Lehrer 78%), die andere Hälfte weniger als die Hälfte ihrer Stunden (eine Lehrerin 24%).

Schularten und Ort: Es wurden 4 Lehrer an Gymnasien und 6 LehrerInnen an Mittelschulen hospitiert. Aus logistischen Gründen befinden sich alle Schulen in Dresden und naher Umgebung von Dresden. Örtlich konnte die Stichprobe somit nicht differenziert werden. Alle Schulen befinden sich in Sachsen, sind öffentliche Schulen, die an den sächsischen Lehrplan gebunden sind, und befinden sich zudem im städtischen Raum. Da der sächsische Lehrplan einen vergleichsweise hohen Grad an Mathematisierung im bundesweiten Vergleich vorsieht, sollte die Stichprobe in diesem Bereich ergiebig sein. Unter den MittelschullehrerInnen wurden 5 Realschulklassen und eine Hauptschulklassse hospitiert. Die Stichprobe „Gymnasium“ und die Stichprobe „Mittelschule“ sind dabei in unterschiedlichen Merkmalen andersartig (s. Abb. 10.1). Am Gymnasium konnte leider keine weibliche Lehrerin für die Erhebung gewonnen werden. Außerdem haben alle untersuchten Gymnasiallehrer nur wenig Berufserfahrung. In der Stichprobe „Mittelschule“ sind Männer und Frauen vertreten. Alle an der Erhebung teilnehmenden MittelschullehrerInnen haben mindestens 25 Jahre Berufserfahrung. Dies spiegelt im Ansatz aber auch die normale Altersstruktur an sächsischen Schularten zum Erhebungszeitpunkt wider: An allen sächsischen allgemeinbildenden Schulen waren im Schuljahr 2015/2016 36% der LehrerInnen 55 Jahre und älter. An Mittelschulen waren in diesem Zeitraum 41% 55 Jahre und älter (vgl. Statistisches Landesamt des Freistaates Sachsen, 2016, S. 14).

Die Stichprobe stellt keinen Anspruch auf Repräsentativität. Die Aussagen, die mit Hilfe der verwendeten Methoden gemacht werden können, können ebenfalls keinen Anspruch auf Allgemeingültigkeit stellen. Vielmehr soll ein möglichst breites Spektrum aufgezeigt werden. Aus diesem Grund ist es vertretbar, dass zum Beispiel bei den Merkmalen Alter und Berufserfahrung die Stichprobe kein Mittelfeld abdeckt. Für die Methode des kontrastiven Vergleichs kann dies auch von Vorteil sein. Dass fast alle LehrerInnen Mathematik als Zweitfach unterrichten, ist dadurch zu begründen, dass die Ergebnisse zum Umgang mit Formeln so möglichst ergiebig sein könnten. Da die Stichproben „Gymnasium“ und „Mittelschule“ zu klein für einen Vergleich und eine Typenbildung sind, ist vertretbar, dass sie derart unterschiedlich gestaltet sind.

Insgesamt wurden 74 Unterrichtsstunden hospitiert und aufgezeichnet, davon wur-

den etwa 32 Zeitstunden Unterricht transkribiert. Pro LehrerIn wurden zwischen 5 und 10 Unterrichtsstunden aufgezeichnet und zwischen 123 Minuten und 327 Minuten Unterricht transkribiert und mit Hilfe der qualitativen Inhaltsanalyse ausgewertet (Verteilung der Stunden auf einzelne LehrerInnen s. Tab. D.1 im Anhang).

LehrerIn	Jasper	Schmitt	Lenz	Funke	Berger	Carle	Gerber	Meyer	Weber	Müller
Gymnasium	✓	✓	✓	✓						
Realschule					✓	✓		✓	✓	✓
Hauptschule							✓			
weiblich					✓	✓	✓			✓
männlich	✓	✓	✓	✓				✓	✓	
Alter im Erhebungszeitraum	46	31	29	31	58	55	54	61	52	50
Berufserfahrung	5	3	2	1	34	31	31	31	29	25
Physikstunden pro Woche	14	18	18	6	8	6	10	10	8	10
Mathematik als zweites Fach	✓	✓		✓	✓	✓	✓		✓	✓

Tabelle 10.1.: Merkmale der Stichprobe

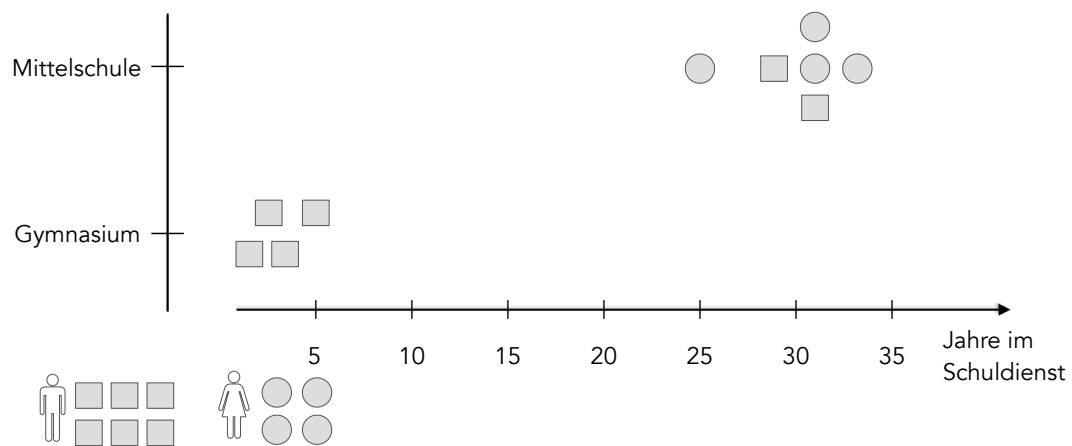


Abbildung 10.1.: Beschreibung der Stichprobe: Geschlecht und Erfahrungsjahre

11. Gütekriterien

Um die Qualität einer empirischen Studie abschätzen zu können, ist es von großer Relevanz, ihre Güte zu bewerten. In der quantitativen Forschung haben sich hierfür die Gütekriterien der Objektivität, Validität und Reliabilität durchgesetzt. Für qualitative Untersuchungsmethoden sind diese Kriterien nur bedingt übertragbar, da der Prozess qualitativer Forschung immer auch subjektive Interpretationen enthält. Somit müssen für qualitative Studien eigenen Gütekriterien formuliert werden (vgl. z. B. Steinke, 2013, S. 322-323).

In Anlehnung an die genannten Gütekriterien quantitativer Forschung können für qualitative Untersuchungen folgende Gütekriterien formuliert werden, deren Erfüllung für diese Erhebung im Anschluss diskutiert werden soll:

- Objektivität: Intersubjektivität, Nachvollziehbarkeit
- Reliabilität: InterCoder-Übereinstimmung, Konsistenzregel
- Validität: kollegiale Validierung, qualitative Stichprobe, Konsistenzregel (vgl. Kruse, 2015, S. 54-58)

Die **intersubjektive Nachvollziehbarkeit** ist ein zentrales Gütemerkmal qualitativer Untersuchungen (vgl. z. B. Steinke, 2013; Kruse, 2015, S. 324 bzw. S. 55). In dieser Erhebung sollen folgende Maßnahmen die intersubjektive Nachvollziehbarkeit gewährleisten: Der Forschungsprozess wird dokumentiert, indem die Erhebungsmethoden und -instrumente beschrieben und veröffentlicht werden (s. Beschreibung der Auswertungsmethoden in Kap. 9, Forschungs- und Analyseinstrumente im Anhang in Kap. A bzw. B). Für die Datenauswertung wurde das regelgeleitete Verfahren der qualitativen Inhaltsanalyse nach Kuckartz (2016) genutzt. Dies erleichtert eine Nachvollziehbarkeit des Forschungsprozesses selbst.

Etwa 10% der Daten wurden von einer InterCoderin zweitcodiert. Damit wurde die Güte des Kategoriensystems, des Codierleitfadens und der Codierungen selbst überprüft und verbessert. Die erreichte **InterCoder-Übereinstimmung** beträgt 66% (s. Kap. C.1 im Anhang für eine genauere Aufschlüsselung und Analyse). Alle abweichenden Codierungen wurden diskutiert und es konnte in allen Fällen ein Konsens

in der Kategorienzuordnung gefunden werden. Der Codierleitfaden und das Kategoriensystem wurden im Zuge der Diskussionen überarbeitet. Weitere 10% der Daten wurden von der Forscherin selbst mit zeitlichem Abstand von 10 Monaten ein zweites Mal codiert. Die Intracoder-Übereinstimmung beträgt 84,75% (s. Kap. C.2 im Anhang für eine genauere Aufschlüsselung).¹

Die **Konsistenzregel** besagt, dass in den Daten gefundene Themen und Relationen im gesamten Datenmaterial konsistent zu finden sind (vgl. Kruse, 2015, S. 56). Dies trifft auf diese Erhebung zu, da die gefundenen Kategorien immer bei unterschiedlichen LehrerInnen und auch für unterschiedliche Formeln identifiziert werden konnten. In welchem Maße diese Konsistenz für die jeweiligen Kategorien ausgeprägt ist, wird in den Beschreibungen der einzelnen Kategorien in Kapitel 12 diskutiert. Die Konsistenz der Ergebnisse wurde außerdem durch einen Abgleich mit den theoretischen Grundlagen und den Vergleich mit anderen Studien-Ergebnissen überprüft (s. z. B. Kap. 14.5).

Die **kollegiale Validierung** ist eine Methode zur Überprüfung der Passung von Fragestellung der Forschung und Analysemethoden sowie Ergebnissen. Die hier vorgestellte Studie wurde in allen Phasen (Konzeption, Durchführung, Datenaufbereitung und Datenanalyse) von mehreren ForscherInnen der Arbeitsgruppe begleitet und mit ihnen diskutiert. Insbesondere wurden das Kategoriensystem und der Codierleitfaden mehrfach diskutiert überarbeitet. Grenzfälle und schwierige Interpretationen wurden ebenfalls mit der Arbeitsgruppe diskutiert.

In der qualitativen Forschung wird meist mit kleinen Stichprobengrößen gearbeitet. Im Falle dieser Arbeit beträgt die Stichprobengröße $N = 10$. Bei dieser Größenordnung kann nicht davon ausgegangen werden, dass für eine Gesamtpopulation allgemeingültige Aussagen wie bei quantitativen Studien gemacht werden können. Um dennoch in einem gewissen Grad verallgemeinerbare Aussagen generieren zu können, muss die Auswahl der **qualitativen Stichprobe** maximal variierend sein, um ein möglichst heterogenes Bild abzudecken (vgl. Kruse, 2015, S. 57). Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Stichprobe dahingehend bewusst ausgewählt. Die einzelnen Probanden variieren in den erhebbaren Merkmalen der Schulform, des Geschlechtes, Alters, unterrichteten Zweifaches und der Berufserfahrung. Durch die Varianz in diesen greifbaren Merkmalen wird eine Varianz in Einstellungen zu und Umgang mit mathematischen Elementen im Allgemeinen und Formeln im Speziellen erhofft. Eine genaue Beschreibung und Analyse der Stichprobe ist in Kapitel 10 zu finden.

¹Für die Berechnung einer Inter-coder-Reliabilität bietet sich das Datenmaterial nicht an, da keine festen Codiereinheiten festgelegt wurden (vgl. Kuckartz, 2016, S. 216).

Teil III.

Ergebnisse

12. Wie sprechen LehrerInnen mit und über Formeln?

Die im Folgenden dargestellten empirischen Ergebnisse teilen sich in zwei Teile. In den Kapiteln 12.1, 12.2 und 12.3 werden zunächst das Kategoriensystem und alle durch die qualitative Inhaltsanalyse erhaltenen Kategorien beschrieben und analysiert. In Kapitel 13 wird genauer beschrieben, wie das Kategoriensystem und das Ebenenmodell miteinander zusammenhängen. In Kapitel 14 werden die zentralen Ergebnisse der Kategorien und ihrer Analysen noch einmal zusammengefasst und zur dargestellten Theorie aus Abschnitt I in Bezug gesetzt. Hier wird diskutiert, welche Aspekte von Formelverständnis die LehrerInnen ansprechen.

Das Kategoriensystem (vgl. Abb. 12.2) gliedert sich in die drei Oberkategorien *Formel wird gesprochen* (Kap. 12.1), *Formel wird angewendet oder interpretiert* (Kap. 12.2) und *Über Formel wird gesprochen* (Kap. 12.3). Die Oberkategorien haben jeweils unterschiedliche Anteile an den Gesamtcodings. Den deutlich größten Anteil nimmt die Kategorie *Formel wird angewendet oder interpretiert* ein (66%). Diese Kategorie ist die inhaltlich breiteste Kategorie. In diesem großen Anteil spiegelt sich ein zentrales Ergebnis der Analysen wider: Nicht jedes Mal, wenn eine Formel angewendet oder interpretiert wird, wird diese auch selbst gesprochen. Die Kategorie *Formel wird gesprochen* kommt nur ungefähr ein Drittel so oft vor (s. Diagramm 12.1). Dies deutet darauf hin, dass Formeln häufig nur implizit angewendet oder interpretiert werden und der Bezug zur Formel nicht immer explizit hergestellt wird.

Die drei analysierten Formeln sind nicht in gleichem Umfang in den Codings repräsentiert. Der Großteil der codierten Textstellen (N=1337) entfällt mit etwa 54% der Codings auf die Formel $R = \frac{U}{I}$. Der nächstgrößere Anteil von etwa 34% entfällt auf das Widerstandsgesetz $R = \rho \cdot \frac{l}{A}$ (N=830). Für das Ohmsche Gesetz $I \sim U$ konnten nur 318 relevante Textstellen codiert werden, was etwa 13% aller Codings entspricht (vgl. Diagramm 12.1). Dies ist insbesondere der unterschiedlichen inhaltlichen Relevanz der Formeln, die auch durch den sächsischen Lehrplan gestützt wird, zuzuschreiben. Auf Grund dieser unterschiedlichen Verteilungen sind die Häufigkeitsanalysen für die einzelnen Formeln kritisch zu reflektieren.

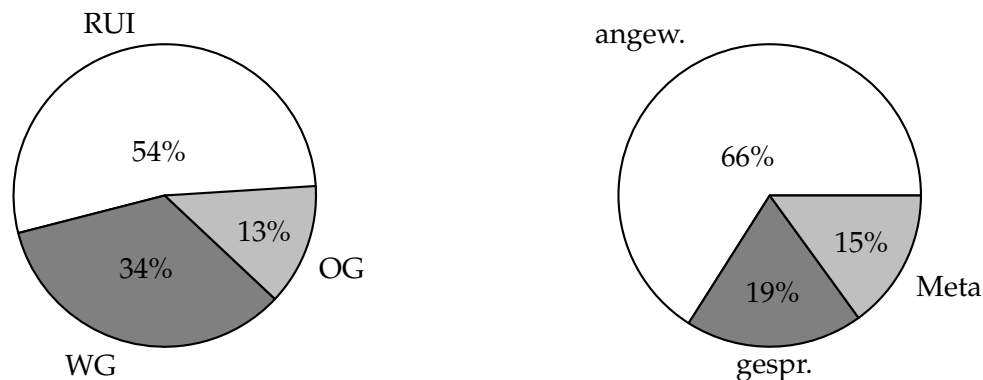


Abbildung 12.1.: Anteile der Formeln und der Oberkategorien an den Gesamtcodings (N=2491)

WG...Widerstandsgesetz, OG...Ohmsches Gesetz,

RUI...Definitionsformel $R = \frac{U}{I}$

angew...Kategorie *Formel wird angewendet oder interpretiert*

gespr...Kategorie *Formel wird gesprochen*

Meta...Kategorie *Über Formel wird gesprochen*

Die Oberkategorien haben ihnen jeweils hierarchisch untergeordnete Unterkategorien (in Abb. 12.2 unterschiedliche Pfade). An einigen Stellen gibt es bis zu vier hierarchische Stufen. So gibt es beispielsweise in der Kategorie *Formel wird angewendet oder interpretiert* (=erste Hierarchie-Stufe) die Unterkategorie *Zusammenhang der Größen untereinander* (=zweite Hierarchie-Stufe) mit der untergeordneten Kategorie *Proportionalität* (=dritte Hierarchie-Stufe) und hierzu den Unterkategorien *Proportionalität I*, *Proportionalität IIB* und *Proportionalität III* (=vierte Hierarchie-Stufe). Das gesamte Kategoriensystem kann jeweils auf die drei in der Erhebung betrachteten Formeln $R = \frac{U}{I}$, $R = \rho \cdot \frac{l}{A}$ und $I \sim U$ angewendet werden.

Das Kategoriensystem entwickelte sich zunächst parallel zum in Kapitel 5 beschriebenen Ebenenmodell der Versprachlichung von Formeln. Im Laufe des Codierungsprozesses und durch mehrere diskursive Validierungen des Kategoriensystems zeigte sich ein stärker inhaltlich gegliedertes Kategoriensystem als handhabbarer. Daher wurde von den Oberkategorien I bis VI entlang der Ebenen abgesehen und stattdessen die oben beschriebenen drei inhaltlichen Oberkategorien gebildet (s. auch Beschreibung des methodischen Vorgehens in Kap. 9.2). Während die Kategorie *Formel wird gesprochen* deckungsgleich mit den Ebenen I bis III des Ebenenmodells ist und die Kategorie *Über die Formel wird gesprochen* die Meta-Ebene darstellt, spiegeln sich in der Kategorie *Formel wird angewendet oder interpretiert* die Ebenen IV, V und VI des Modells wider.

Die einzelnen Kategorienbeschreibungen sind so aufgebaut, dass sie neben inhaltlichen Beschreibungen auch quantitative Auswertungen über Häufigkeiten enthalten. Aufgrund der geringen Stichprobengröße und der qualitativen Ausrichtung des Forschungsprojektes sollen diese vorrangig der Veranschaulichung von Schwerpunkten dienen, die im hospitierten Unterricht ausgemacht werden können. Die Häufigkeiten hängen jeweils auch von der hospitierten und der transkribierten Unterrichtszeit in der Erhebung ab, die bei jeder Lehrperson unterschiedlich sind (s. hierzu auch Kap. 9.3). Der Fokus liegt also auf einem kontrastiven Vergleich solcher Aussagen, die bei vielen LehrerInnen und sehr häufig vorkommen, gegenüber solchen, die nur sehr selten und eventuell nur von einzelnen LehrerInnen gemacht wurden. Der Schwerpunkt liegt auf einer qualitativen Charakterisierung der identifizierten Kategorien. Dies wird an vielen Stellen durch Zitate aus den Transkripten gestützt.¹ Die Beschreibungen der Kategorien enthalten Vergleiche der unterschiedlichen Formeln, wenn die Kategorien für die drei Formeln in ihrer Häufigkeit oder inhaltlichen Gestaltung unterschiedlich ausgeprägt sind. Zum anderen fallen bei vielen Kategorien Unterschiede zwischen den einzelnen an der Erhebung beteiligten Lehrpersonen auf. In diesen Fällen werden auch die Häufigkeiten auf Ebene der LehrerInnen noch einmal verglichen. Da diese Vergleiche nicht bei allen Kategorien ergiebig sind, sind die Kategorienbeschreibungen nicht identisch strukturiert und enthalten unterschiedliche Schwerpunktsetzungen.

¹In diesen Zitaten werden die Pseudonyme der LehrerInnen durch die in Abschnitt 10 genannten und im Anhang A.1 zugeordneten Alias-Namen ersetzt. Werden SchülerInnen angesprochen, so wird das in den Transkripten stehende „X“ für den realen Namen des Schülers oder der Schülerin zu Gunsten einer besseren Lesbarkeit mit einem willkürlich gewählten Namen ersetzt. Die Namen werden ohne Berücksichtigung des Geschlechts gewählt. Eine Zuordnung zu realen Personen ist nicht möglich.

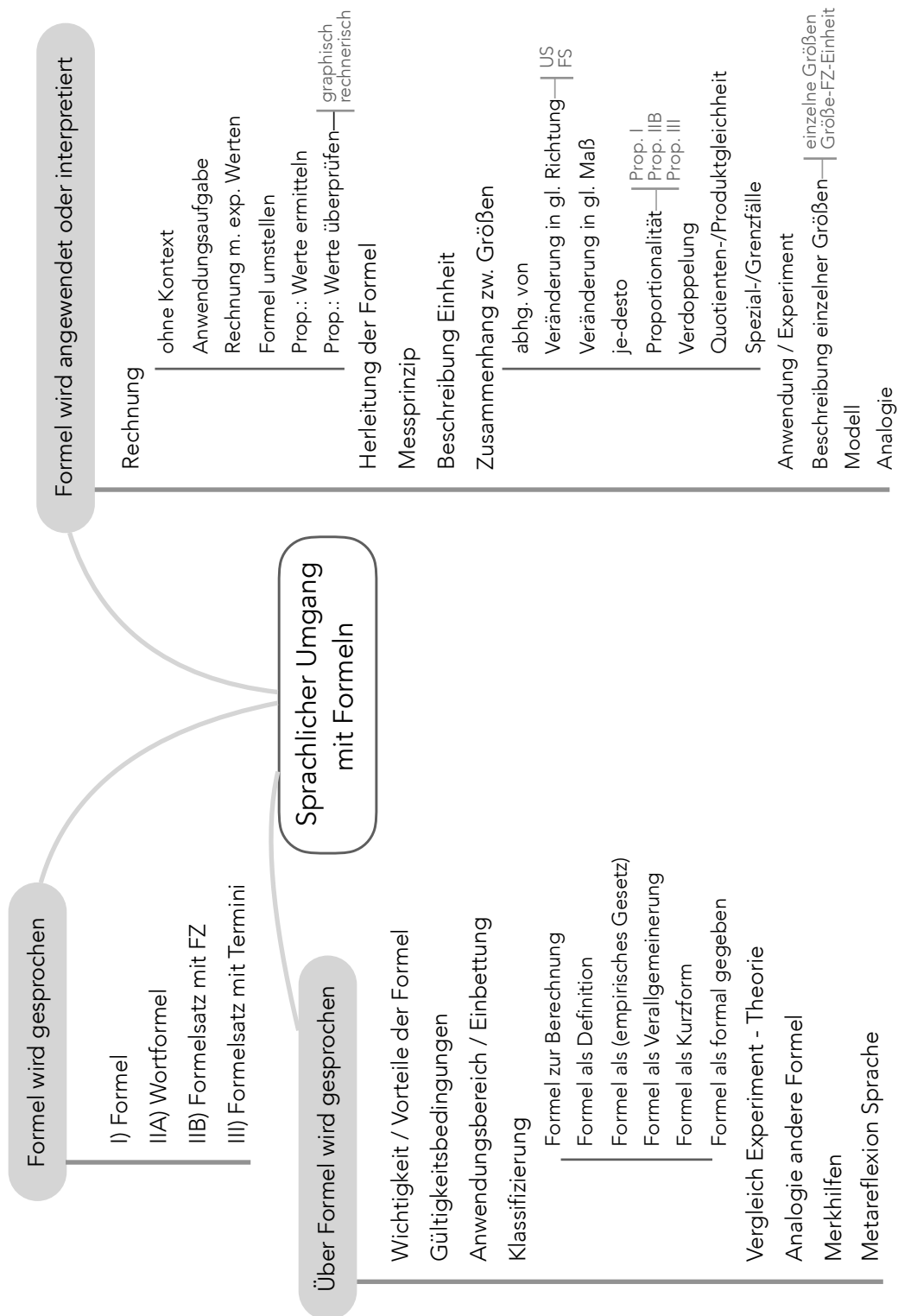


Abbildung 12.2.: Kategoriensystem

12.1. LehrerInnen sprechen und schreiben Formeln

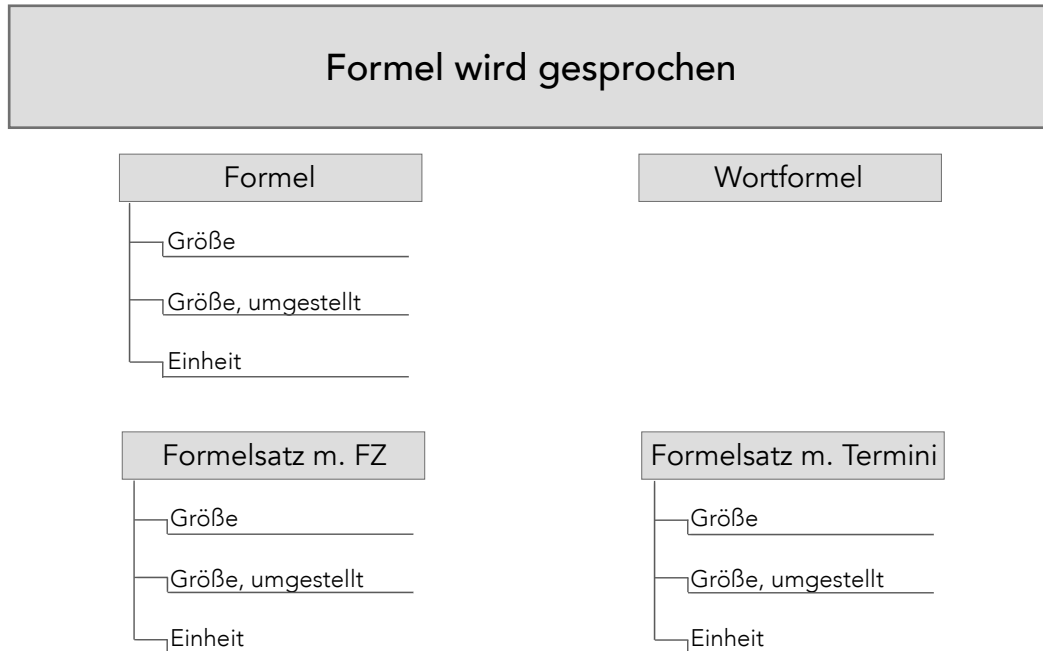


Abbildung 12.3.: Kategorien der Oberkategorie „Formel wird gesprochen“

Bei der Oberkategorie *Formel wird gesprochen* handelt es sich um eine deskriptive Kategorie. Die Aussagen, die hier zusammengefasst werden, sind Verbalisierungen und schriftliche Notationen der Formel selbst analog zu den Ebenen I bis III des in Kapitel 5 beschriebenen Ebenenmodells. Die Kategorien repräsentieren die Ebenen I (Formel), IIA (Wortformel), IIB (Formelsatz mit Formelzeichen) und III (Formelsatz mit Termini) des Ebenenmodells und unterscheiden sich hinsichtlich der äußeren Form, in der die Formel geschrieben oder gesprochen wird. Die Häufigkeitsverteilung der Kategorien von *Formel wird gesprochen* ist in Diagramm 12.4 dargestellt. Insgesamt ist auffällig, dass Formeln in dieser Erhebung ungefähr halb so oft geschrieben ($|I| + |IIA| = 152$) wie gesprochen ($|IIB| + |III| = 311$) werden. Formeln werden im beobachteten Unterricht häufiger mit Formelzeichen gesprochen (Kategorie IIB: 188 Codings), als dass die Formelzeichen in ihre entsprechenden Termini übertragen werden (Kategorie III: 123 Codings).

Auffällig bei der Betrachtung der Verteilung der codierten Textstellen auf die einzelnen LehrerInnen (vgl. Diagramm D.4 im Anhang) sind die deutlichen Unterschiede in

der Häufigkeit. So gibt es LehrerInnen, die insgesamt sehr wenig Formeln schreiben oder sprechen (Herr Weber: 6 geschrieben, 15 gesprochen; Frau Gerber 15 geschrieben, 19 gesprochen) und auf der anderen Seite LehrerInnen, bei denen sehr viele codierte Textstellen in die Kategorie *Formel wird gesprochen* fallen (Frau Müller: 18 geschrieben, 68 gesprochen; Herr Meyer: 13 geschrieben, 45 gesprochen). Ins Gewicht fallen hierbei insbesondere die Unterschiede in der Anzahl der gesprochenen Formeln. Die Größenordnung der an die Tafel oder auf ein Arbeitsblatt geschriebenen Formeln ist bei allen untersuchten LehrerInnen in etwa gleich ($\star = 15$, Minimum = 6, Maximum = 26). Herr Lenz ist mit 26 geschriebenen und 20 gesprochenen Formeln die einzige Person, bei der mehr schriftliche als mündlich gesprochene Formeln vorkommen. Es gab bei ihm somit Formeln, die lediglich an der Tafel oder auf einem Arbeitsblatt standen, ohne dass diese explizit verbalisiert wurden. Sowohl die Lehrerin mit der maximalen Anzahl gesprochener und geschriebener Formeln, als auch der Lehrer mit der minimalen Anzahl unterrichten an Mittelschulen (vgl. Diagramme D.3). Obwohl der Lehrplan der Mittelschule die Formel für das Widerstandsgesetz nicht explizit fordert, kann hier also kein deutlicher Unterschied zwischen den Schulformen ausgemacht werden.

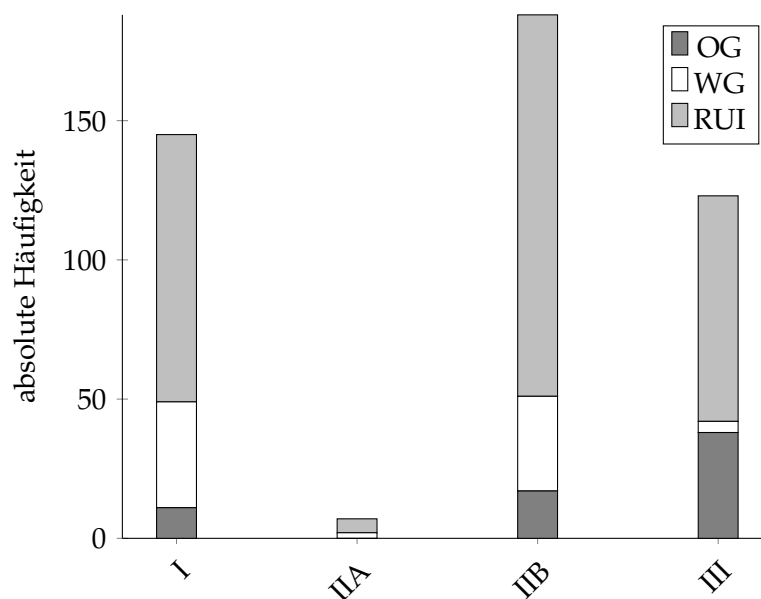


Abbildung 12.4.: Codehäufigkeiten Kategorien zu *Formel wird gesprochen*
 I...Formel, IIA...Wortformel, IIB...Formelsatz mit FZ, III...Formelsatz mit Termini

12.1.1. Formel

Die Kategorie *Formel* umfasst Formeln, die schriftlich an der Tafel oder auf Arbeitsblättern notiert werden. Dies geschieht im hospitierten Unterricht, wenn eine Formel eingeführt wird, wenn mit ihr gerechnet wird oder wenn sie für Nebenrechnungen an die Tafel geschrieben wird. Diese Kategorie entspricht der Ebene I des Ebenenmodells (s. Kap. 5.4). Die notierten Formeln kommen neben der Grundform, die als Kategorie *I-Größe* bezeichnet wird, auch in umgestellter Form vor (*I-umgestellt*). Als dritte Variante werden Einheiten in einer Formel miteinander gleichgesetzt (*I-Einheit*) und für die Definitionsformel $R = \frac{U}{I}$ gab es den Spezialfall $\frac{U}{I} = \text{konst.}$. Die Grundformen der Formeln kommen am häufigsten vor, die anderen 3 Unterkategorien werden im hospitierten Unterricht nur jeweils sehr selten codiert (vgl. Diagramm 12.5). Dies ist dadurch zu erklären, dass es sich bei umgestellten Formen jeweils um Spezialfälle der Grundform handelt. Auch der Vergleich der Häufigkeiten der einzelnen Formeln scheint logisch nachvollziehbar. Die Definitionsformel $R = \frac{U}{I}$ wird als grundlegende Formel für den Widerstand in zahlreichen Rechnungen auch während des Unterrichts zum Widerstandsgesetz immer wieder angewendet und wiederholt. Dies führt dazu, dass diese Formel im hospitierten Unterricht mit Abstand am häufigsten notiert wird.

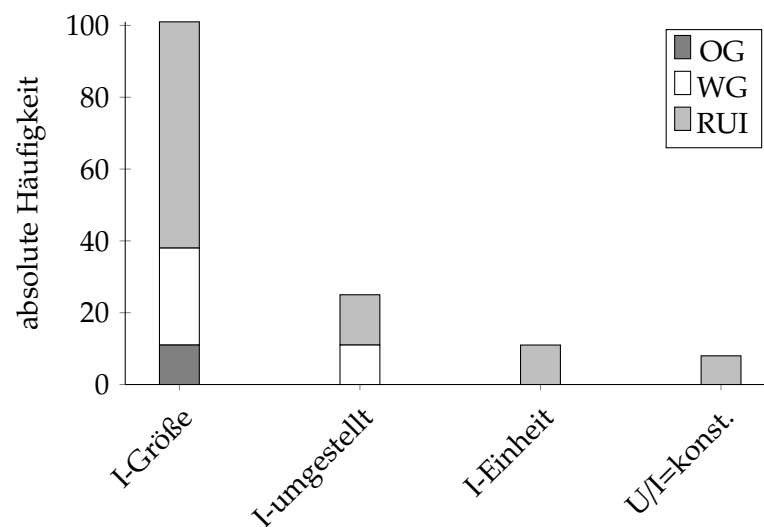


Abbildung 12.5.: Codehäufigkeiten Unterkategorien zu *Formel*

Für die **Definitionsformel** gibt es nur wenige Abweichungen von der grundlegenden Notation $R = \frac{U}{I}$. Einmal wird sie in umgekehrter Reihenfolge notiert ($\frac{U}{I} = R$), dreimal wird nur ein Teil der Gleichung ($\frac{U}{I}$) notiert. In 11 Fällen werden die Formel-

zeichen in einer konkreten Rechnung mit Indizes versehen, zum Beispiel $R_{\text{ges}} = \frac{U_{\text{ges}}}{I_{\text{ges}}}$. Als umgestellte Form kommen folgende Formeln vor, wobei die Varianten (1) fünfmal und (4) sechsmal vorkommen, während alle anderen nur einmal auftauchen:

$$(1) U = R \cdot I \quad (2) I \cdot R = U \quad (3) R \cdot I = U \quad (4) I = \frac{U}{R} \quad (5) \frac{1}{R} = \frac{I}{U}$$

Als Entsprechung der Einheiten werden etwa gleich häufig entweder bekannte Einheiten als neue Einheit definiert ($1 \frac{\text{V}}{\text{A}} = 1 \Omega$) oder die neue Einheit durch bekannte beschrieben ($1 \Omega = 1 \frac{\text{V}}{\text{A}}$). Im letzteren Fall geschieht dies in drei Fällen im Zusammenhang mit einer Rechnung, indem die Einheit innerhalb der Rechnung wiederholt wird oder sogar erst nach einer oder durch eine Beispielrechnung mit der Formel eingeführt wird. Als Spezialform wird für die Definitionsformel außerdem der Ausdruck $\frac{U}{I} = \text{konst.}$ aufgefasst, der häufig in Vorbereitung der Formel selbst oder im Rahmen von Gültigkeitsbetrachtungen zum Ohmschen Gesetz notiert wurde.

Das **Widerstandsgesetz** wird im hospitierten Unterricht auf drei unterschiedliche Arten notiert, wobei Variante (1) mit 21 (von insg. 27 Codierungen, 78%) mit Abstand am häufigsten vorkommt, während die (2) nur fünfmal und die (3) nur ein einziges Mal Verwendung findet:

$$(1) R = \varrho \cdot \frac{l}{A} \quad (2) R = \frac{\varrho \cdot l}{A} \quad (3) R = \varrho \cdot (l/A)$$

In umgestellter Form gibt es verschiedene Varianten, die für die Berechnung der Länge eines Leiters genutzt werden, wobei die (1) dreimal und die (2) zweimal, alle anderen nur einmal auftauchen:

$$(1) l = \frac{R \cdot A}{\varrho} \quad (2) \frac{R \cdot A}{\varrho} = l \quad (3) l = \frac{l}{A} \cdot \varrho \quad (4) l = (R \cdot A)/\varrho$$

Außerdem wird die Formel nach ϱ (dreimal) und nach A (einmal) umgestellt:

$$(1) \frac{R \cdot A}{l} = \varrho \quad (2) A = \varrho \cdot \frac{l}{R}$$

Für das **Ohmsches Gesetz** gibt es beide möglichen Formen der Formulierung: $I \sim U$ (siebenmal) und $U \sim I$ (viermal). Hier gibt es keine weiteren Unterkategorien.

Vergleich der LehrerInnen: Wie bereits im einführenden Text zur Kategorie *Formel wird gesprochen* beschrieben, ist die Anzahl notierter Formeln bei allen beobachteten LehrerInnen in etwa der gleichen Größenordnung. Obwohl laut sächsischem Lehrplan Formeln am Gymnasium einen höheren Stellenwert einnehmen sollen als an der Mittelschule und in diesem Lernbereich das Widerstandsgesetz auch nur am Gymnasi-

um verpflichtend behandelt werden muss, zeigt sich bei den beobachteten LehrerInnen kein deutlicher Unterschied zwischen Mittelschule und Gymnasium (vgl. die Kategorie I im Diagramm D.4 im Anhang). Bei beiden Schulformen gibt es sowohl LehrerInnen, die nur sehr selten Formeln notieren (Gymnasium: Herr Schmitt: 8, Mittelschule: Herr Weber: 6) und solche, die sehr häufig Formeln notieren (Gymnasium: Herr Lenz: 25, Mittelschule: Frau Müller: 16). Da es sich um keine repräsentative Stichprobe handelt, erlaubt diese Auffälligkeit keine Rückschlüsse auf die Schularten im Allgemeinen. In Bezug auf die Stichprobe erlaubt dies aber das Erkennen der Tendenz, dass Formeln in dieser Erhebung in beiden Schularten ähnlich stark repräsentiert sind und somit die These, dass sie eine ähnlich wichtige Rolle im Unterricht spielen.

12.1.2. Wortformel

Die Kategorie *Wortformel* entspricht der Ebene IIA des Ebenenmodells (s. Kap. 5.4). Hier werden Formeln codiert, die mit ausgeschriebenen Termini anstelle der Formelzeichen notiert werden. Dies geschieht in allen codierten Textstellen dann, wenn eine Formel eingeführt wird. Die folgenden Formeln zeigen Beispiele für die Definitionsformel des Widerstandes und das Widerstandsgesetz. Für das Ohmsche Gesetz wurde keine entsprechende Notation gefunden.

$$\text{el. Widerstand} = \frac{\text{Spannung am Bauelement}}{\text{Stromstärke im Bauelement}} \quad (\text{EPR4, TB})$$

$$\text{Widerstand} = \text{spezif. el. Widerstand} \cdot \frac{\text{Länge}}{\text{Querschnitt}} \quad (\text{LRR10, TB})$$

Die gefundenen Notationen unterscheiden sich leicht in den verwendeten Termini. So findet sich bei einer zweiten Lehrerin für das Widerstandsgesetz für das Formelzeichen R die Umschreibung „Elektrischer Widerstand eines Leiters“. Für die Definitionsformel werden zweimal die Begriffe „Widerstand“, „Spannung“, „Stromstärke“ ohne das Adjektiv elektrisch genutzt. Die oben beschriebene Variante findet sich ebenfalls bei zwei unterschiedlichen LehrerInnen. Außerdem gibt es einmal die Begriffskombination „am Bauteil anliegende Spannung“ und „Stromstärke“.²

Die Kategorie *Wortformel* kommt mit nur 7 Codierungen sehr selten vor (vgl. Diagramm 12.4). Dabei verteilen sich 2 Codierungen auf das Widerstandsgesetz und 5 Codierungen auf die Definitionsformel $R = \frac{U}{I}$. Nur 5 der 10 LehrerInnen nutzen diese

²Diese letzte Variante kann begrifflich als etwas unglücklich angesehen werden, da sie die Konzepte der anliegenden (Quell-)spannung und der im Stromkreis an den einzelnen Bauteilen abfallenden Spannung vermischt.

Form der Notation bei der Einführung einer Formel (vgl. Diagramm D.4 im Anhang), sie ist somit weit weniger verbreitet als die anderen Unterkategorien von *Formel wird gesprochen*.

12.1.3. Formelsatz mit Formelzeichen

Die Kategorie *Formelsatz mit Formelzeichen* entspricht der Ebene IIB des Ebenenmodells (s. Kap. 5.4). Eine Formel wird gesprochen, die physikalischen Termini werden dabei als Formelzeichen gesprochen. Aussagen werden dieser Kategorie zugeordnet, sobald mindestens eine physikalische Größe nur mit ihrem Formelzeichen gesprochen wird. Die Kategorie kommt für alle drei Formeln vor, wobei der weitaus größte Teil der Codierungen auf die Definitionsformel $R = \frac{U}{I}$ fällt (137 von 188 Codierungen, etwa 73%, vgl. Diagramm 12.4). Wie bereits in der notierten Form (*Formel*, Kap. 12.1.1), wird die Formel in ihrer Grundform (*IIB-Größe*), in umgestellter Form (*IIB-umgestellt*) und in zwei Fällen auch ihre zugehörigen Einheiten (*IIB-Einheit*) gesprochen. Mit Abstand am häufigsten wird bei allen Formeln die Grundform verwendet (vgl. Diagramm 12.6).

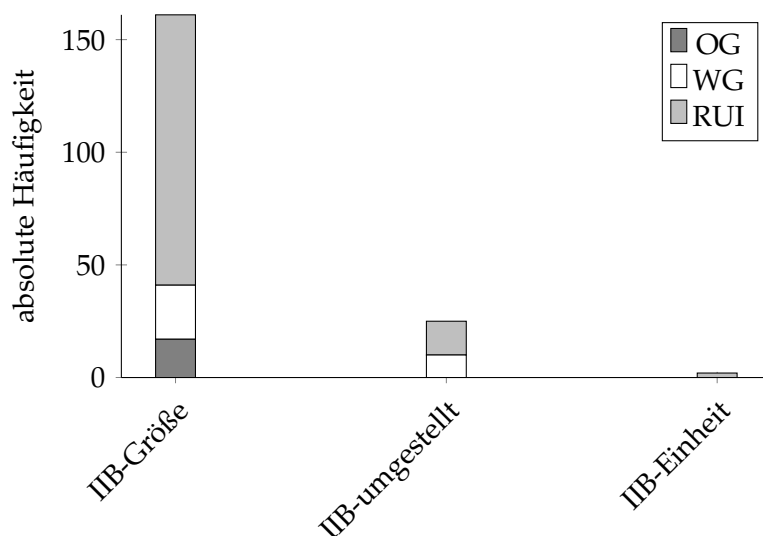


Abbildung 12.6.: Codehäufigkeiten Unterkategorien zu *Formelsatz mit Formelzeichen*

Für die **Definitionsformel** $R = \frac{U}{I}$ finden sich zahlreiche unterschiedliche Formulierungen, die im Folgenden aufgezählt werden:

- (1) „ R ist gleich U geteilt durch I .“
- (2) „ R ist gleich U durch I .“ Einmal auch: „ U durch I ist gleich R .“ (EPR10, 132)

(3) „ R gleich U durch I .“

(4) „ R ist U durch I .“ Einmal auch: „Hier ist R U durch I .“ (EPR10, 142)

Es zeigt sich somit auch schon auf dieser Ebene des sprachlichen Umgangs mit Formeln eine gewisse Variantenvielfalt. Außerdem wird in etwa der Hälfte der Codings nur der hintere Teil der Formel gesprochen. In diesen Fällen handelt es sich genau genommen um keine Formel mehr, da nicht zwei algebraische Ausdrücke miteinander gleichgesetzt werden, sondern um einen algebraischen Ausdruck, der in diesem Fall zu einer Größe (dem Widerstand R) gehört, ohne dass diese Zugehörigkeit durch eine Formel, beziehungsweise ein „ R gleich“ expliziert wird:

(5) „ U geteilt durch I .“

(6) „ U durch I .“

(7) „Quotient U geteilt durch I .“

(8) „Quotient U durch I .“

(9) „Bruch U durch I .“

Am häufigsten sind mit 34 beziehungsweise 33 Codierungen die Varianten (6) und (2) (in der Aufzählung hervorgehoben). Das entspricht in beiden Fällen etwa 28% der gesamten Codierungen in dieser Kategorie für die Definitionsformel.

Als weitere Möglichkeit wird die Formel auf konkrete Werte innerhalb einer Rechnung adaptiert („ U -eins durch I -eins“, AWR2, 84). In anderen Fällen wird die Formel in umgestellter Form gesprochen (z. B. „ U ist gleich R mal I “, ABG1, 106) und eine Lehrerin spricht einmalig auch die Einheiten als Buchstaben („ V durch A “, BTR2, 340). In allen anderen Fällen werden Einheiten im untersuchten Unterricht jedoch ausgesprochen und nicht mit den ihnen zugeordneten Buchstaben bezeichnet.

Die umgestellten Varianten sind in ihren Häufigkeiten fast identisch mit den Notationen an der Tafel, man kann also davon ausgehen, dass alle unter 12.1.1 beschriebenen umgestellten Formeln genau einmal von der Lehrkraft verbalisiert werden. Die Tabelle 12.1 zeigt die Übersicht der umgestellten Formeln und ihre zugehörigen Verbalisierungen. Die Verbalisierung ist als Beispiel zu verstehen, es kommen auch leicht abgewandelte Formulierungen vor, bei denen beispielsweise „ist gleich“ statt „ist“ gesagt wird. In Klammern wird die Häufigkeit angegeben. Neben den hier aufgelisteten kommt auch einmal ein Ausdruck vor, der physikalisch falsch ist („ U ist gleich, ja, I durch R .“, EPR8, 91).

Notation	Verbalisierung
$U = R \cdot I$ (5) $R \cdot I = U$ (1)	„ U ist R mal I .“ (3) oder „ R mal I “ (3)
$I = \frac{U}{R}$ (6)	„ I ist U durch R “ (2) oder „ U durch R “ (4)
$\frac{1}{R} = \frac{I}{U}$ (1)	„ I durch U “ (1)

Tabelle 12.1.: Notierte und gesprochene Versionen der umgestellten Formeln zu $R = \frac{U}{I}$

Auffällig ist in der Tabelle 12.1 auch zu erkennen, dass die Formel häufig unvollständig gesprochen wird, sodass die Größe, die eigentlich auf der linken Seite des Gleichheitszeichens steht, nicht mitgesprochen wird.

Für das **Widerstandsgesetz** wird vorrangig die Formulierung „ R ist (gleich) Rho mal I durch A “ verwendet. Bei dieser längeren Formel verwenden alle LehrerInnen diese einfache Formulierung, die Formulierung „geteilt durch“ kommt nicht vor und auch mit den Begriffen Produkt oder Quotient wird nicht gearbeitet. Intuitiv scheinen die LehrerInnen hier die Schwierigkeit der Formulierung an die Länge und Komplexität der Formel etwas anzupassen und beim Widerstandsgesetz eher unterrichtssprachliche Begriffe, sowie aktive Verbformulierungen anstelle von Substantivformulierungen zu verwenden („mal“ anstelle von „Produkt“, „durch“ anstelle von „dividiert durch“ oder „Quotient“).

Bei den umgestellten Formen des Widerstandsgesetzes spiegeln sich die in Kategorie *Formel* unter Abschnitt 12.1.1 beschriebenen unterschiedlichen Strukturen wider. Die Formel wird zweimal nach ϱ umgestellt gesprochen (z. B. „ R mal A geteilt durch I gleich diesen konstanten Wert des entsprechenden Stoffes entspricht.“ ABG5, 92). Für die Querschnittsfläche wird nur ein Zwischenschritt in der Umstellung der Formel verbalisiert: „Auf der linken Seite steht A mal R . (...) Dann steht auf der rechten Seite von euch aus gesehen Rho mal I .“ (SBG5, 95) Am häufigsten (7 mal) wird die Formel nach I umgestellt gesprochen. Bei den gefundenen Verbalisierungen spiegelt sich die Struktur der notierten Formel wider, die jeweils von einzelnen LehrerInnen konsistent genutzt wird:

- $I = \frac{R \cdot A}{\varrho}$ wird verbalisiert als „ I ist R mal A durch Rho.“ (z. B. LRR11, 52)
- $I = \frac{R}{\varrho} \cdot A$ wird verbalisiert als „ R durch Rho mal A .“ (z. B. SSG9, 63)
- Nur ein Lehrer betont die Gleichheit der drei möglichen Ausdrücke, $\frac{R \cdot A}{\varrho}$, $\frac{R}{\varrho} \cdot A$, $\frac{A}{\varrho} \cdot R$: „Also R mal A durch Rho oder R durch Rho mal A oder A durch Rho mal R “ (SBG6, 35)

Beim **Ohmschen Gesetz** finden sich die Formulierungen „ I proportional U “ und umgekehrt auch „ U proportional I “. Nur in zwei Fällen wird dieser Ausdruck um das Verb „ist“ ergänzt: „ I ist proportional U .“ (LRR4, 96) Insgesamt wird in 9 der 15 codierten Textstellen die Proportionalität so herum formuliert, dass die Stromstärke proportional zur Spannung sei, das entspricht in etwa dem Verhältnis, in dem auch der Ausdruck $I \sim U$ in dieser Reihenfolge notiert wurde (7 von 11). Außerdem gibt es einmalig auch die allgemeine Formulierung, dass „ U und I proportional zueinander sind“ (BTR2, 152).

Für das Ohmsche Gesetz erscheint diese Kategorie zusätzlich in leicht abgewandelter Form. Für dieses finden sich zwei Codierungen aus der mündlichen Lehrersprache, bei der das proportional-zu-Zeichen ikonisch als „Wellenlinie“ gesprochen wird: „ U und dann so eine Wellenlinie und dann großes I .“ (KPR3, 43). Wie bei den schriftlichen Notationen muss der Lernende das mathematische Zeichen (die Wellenlinie) selbst als entsprechende mathematische Operation (proportional zu) decodieren. Daher unterscheidet sich diese Aussage von den anderen in dieser Kategorie codierten Textstellen.

Vergleich der LehrerInnen: Die Verbalisierung von Formeln mit ihren Formelzeichen kommt bei allen beobachteten LehrerInnen vor. Am häufigsten wird diese Kategorie von Herrn Meyer mit 39 Codierungen genutzt. Sehr selten kommt sie hingegen bei Herrn Weber (2 Codierungen) vor. Bei Herrn Weber stimmt dies mit den ebenfalls nur sehr selten an der Tafel notierten Formeln überein (Kategorie *Formel*), bei Herrn Meyer hingegen fällt auf, dass er Formeln sehr viel häufiger spricht als schreibt.

12.1.4. Formelsatz mit Termini

Die Kategorie *Formelsatz mit Termini* entspricht der Ebene III des Ebenenmodells (vgl. Abschnitt 5.4). Aussagen in dieser Kategorie sind Versprachlichungen von Formeln, bei denen Termini anstelle der Formelzeichen gesprochen werden. Sie kommt mit 126 Codierungen seltener als die Kategorie *Formelsatz mit Formelzeichen* (Ebene IIB, 186 Codierungen) vor. Ob LehrerInnen eher Formelzeichen oder Termini sprechen, scheint auf den ersten Blick in dieser Stichprobe im Zusammenhang zur Formellänge zu stehen, so wird das sehr kurze Ohmsche Gesetz meist mit Termini ausgesprochen (III: 38 Codierungen, IIB: 17 Codierungen), die Definitionsformel sehr viel häufiger mit Formelzeichen als mit Termini gesprochen (III: 43 Codierungen³, IIB: 137 Codierungen) und das Widerstandsgesetz fast ausschließlich mit Formelzeichen gesprochen (III: 4 Codierungen, IIB: 34 Codierungen) (vgl. Diagramm 12.4).

³zusätzlich werden in 38 Fällen die Einheiten verbalisiert

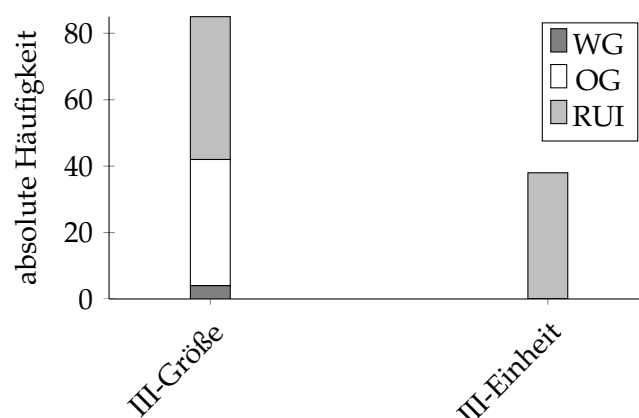


Abbildung 12.7.: Codehäufigkeiten Unterkategorien zu *Formelsatz mit Termini*

Die Kategorie *Formelsatz mit Termini* kommt in der untersuchten Stichprobe nur für die Grundformeln (Unterkategorie *III-Größe*), nicht für umgestellte Formeln vor. Umgestellte Formeln, die in der Erhebung nur im Kontext einer Rechnung vorkommen, werden somit im hospitierten Unterricht immer mit Formelzeichen anstelle der Termini gesprochen.

Für die **Definitionsformel** $R = \frac{U}{I}$ kommen folgende typische Verbalisierungen vor, wobei die Varianten (1) und (6) mit 10 bzw. 12 Codierungen mit Abstand am häufigsten auftreten und somit 23% bzw. 28% der gesamten Codierungen in *III-Größe* für die Definitionsformel ausmachen. Insgesamt wird die Formel 24 mal vollständig und 19 mal unvollständig ($\frac{U}{I}$) verbalisiert.

- (1) „Widerstand ist (gleich) Spannung (geteilt) durch Stromstärke.“ bzw. in umgekehrter Formulierung: „Spannung geteilt durch Stromstärke ist gleich elektrischer Widerstand.“
- (2) aktive Formulierungen, bei denen im Vordergrund steht, was die SchülerInnen tun müssen, z. B.: „Wenn wir den Widerstand suchen, (...) rechnen wir Spannung durch Stromstärke.“ (HBG2, 24)
- (3) Verwendung des Substantives „Verhältnis“: „Das Verhältnis aus Spannung und Stromstärke wird el. Widerstand genannt.“ (KPR3, TB)
- (4) Verwendung des Verbs „dividieren“, z. B.: „Ihr könnt den Widerstand nur berechnen. Und zwar, indem ihr die Spannung durch die Stromstärke dividiert.“ (BTR5, 16)
- (5) Verwendung des Substantives „Quotient“, z. B.: „Also elektrischer Wi-

derstand ist gleich der Quotient aus am Bauteil anliegender Spannung und der gemessenen Stromstärke.“ (KTH3, 91)

Außerdem gibt es auch hier Fälle, bei denen nur ein Teil der Formel verbalisiert wurde:

(6) „Spannung (geteilt) durch Stromstärke“

(7) Verwendung des Substantives „Verhältnis“, z. B.: „Wir suchen ja das Verhältnis von Spannung und Stromstärke.“ (KPR4, 75)

(8) Verwendung des Substantives „Quotient“, z. B.: „Quotienten zwischen Spannung und Stromstärke“ (BTR1, 89)

(3) und (7), also die Verwendung des Substantives „Verhältnis“ kommt nur bei einem Lehrer vor. Neben diesen häufiger vorkommenden Formulierungen gibt es einige Sonderfälle, so gibt es verschiedene Fälle, bei denen Formelzeichen und Termini direkt miteinander verknüpft werden („Elektrischer Widerstand ist immer Spannung U geteilt durch die Stromstärke I .“ ABG6, 41). Es fällt auf, dass bei diesen Formulierungen auch unterschiedliche epistemologische Klassifizierungen der Formel zum Ausdruck gebracht werden, so wird bei (2) und (4) die Funktion der Berechnung einer Größe betont. Der Ausdruck (3) betont implizit den Charakter einer Definitionsformel. Diese Aspekte werden in der Kategorie *Erkenntnistheoretische Klassifizierung der Formel* unter der Oberkategorie *Über Formel wird gesprochen* in Abschnitt 12.3.4 näher beschrieben und analysiert.

Für die Definitionsformel des Widerstandes existiert außerdem die Unterkategorie *III-Einheit*. Hier wird die Entsprechung der Einheiten ausgesprochen. Dies geschieht im hospitierten Unterricht häufig, wenn die Einheit Ohm eingeführt wird. Das folgende Beispiel verdeutlicht dies. Neben der reinen Versprachlichung der Einheitenäquivalenz (fett hervorgehoben) wird auch begründet, warum diese Einheit eingeführt wird, warum sie Ohm heißt und es wird kommentiert, wie das griechische Omega geschrieben wird:

Frau Müller: „Jetzt habe ich ja schon gesagt, der Physiker an sich ist FAUL, der sagt auch nicht 391 Volt durch Ampere. Sondern der will da auch nur EINE Einheit haben. UND jetzt kommt noch mal der Herr Georg Simon Ohm ins Spiel [...]. IHM zu Ehren hat man also diese Einheit Volt geteilt durch Ampere umbenannt in Ohm. Also hinter einem Volt durch ein Ampere steckt die Einheit Ohm. (...) Notieren uns das bitte mal. Einheit Doppelpunkt. Also **ein Volt durch Ampere ist das gleiche wie ein Ohm**.

Und jetzt sieht das bei mir geschmiert so aus. Wenn ihr im Buch schaut, sieht es ein bisschen schöner aus, dieser griechische Buchstabe, den sie da verwendet haben. Es sieht aus wie ein kleines Bäumchen sagen manche Schüler.“ (BTR2, 350)

In anderen Fällen wird im Rahmen einer Rechnung noch einmal explizit betont, dass sich die Einheiten entsprechen. Dies wird im Rahmen des Ergebnisses besprochen, wie Zitat (1) zeigt, oder als Hilfestellung für das korrekte Umstellen der Formel und Kontrolle des Ergebnis der Umstellung angeboten (Zitat (2)).⁴

(1) Frau Gerber: „So und ein Ohm bekommen wir beispielsweise nicht DIREKT bei der Berechnung raus, sondern **EIN OHM ist gleich einer anderen Einheit. Nämlich?**

Anton: „(Volt durch Ampere?)“

Frau Gerber: „Genau“ (KTH2, 211-213)

(2) Frau Müller: „So, wir haben also zwei Ohm ist gleich U durch drei Ampere. Und jetzt kann man sich überlegen und dazu brauchen wir wahrscheinlich ein bisschen die mathematischen Kenntnisse. Wie kriegt man jetzt raus, wie groß das U da oben ist? (...) Vielleicht kann man sich auch noch überlegen, dass das Ohm ja für die Einheit Volt durch Ampere eigentlich steht.“

Frau Müller: „In welcher Einheit erwarten wir unser U , unser Ergebnis?“

Mia: (unv.)

Frau Müller: „Ja, du weißt es nicht. In Volt. Genau. Jetzt müssen wir überlegen, ob Ohm mal Ampere Tatsache Volt ergibt. Und da ersetzen wir mal das Ohm durch die Einheit, die ihr vorhin schon immer genannt habt. Wir haben gesagt, **Ohm ist dasselbe wie Volt durch Ampere**. (...) Und da haben wir also zwei Volt durch Ampere mal Ampere und siehe da, das Ampere kürzt sich weg und es bleibt das Volt übrig, ich habe also richtig umgeformt.“ (BTR 3, 101 & 115-117)

Für das **Widerstandsgesetz** gibt es nur 4 codierte Textstellen in der Kategorie *Formelsatz mit Termini*. Drei von diesen Codings fallen auf eine Lehrerin (Frau Müller). Die

⁴Wird die Entsprechung der Einheiten lediglich im Rahmen einer Rechnung mit konkreten Werten gesprochen, ohne dass dies noch einmal auf die allgemeingültige Äquivalenz zurückgeführt wird, dann wird diese Aussagen nicht zu dieser Kategorie gezählt.

vier Codings lassen sich in zwei unterschiedliche Anwendungsfälle aufteilen: zum einen wird die Formel vollständig verbalisiert im Rahmen von Handlungsanweisungen für Berechnungen (Zitat 1), zum anderen wird explizit noch einmal wiederholt, wofür die Formelzeichen in der Formel stehen (Zitat 2).

(1) Frau Müller: „Man sucht sich den spezifischen Widerstand dieses Materials aus dem Tafelwerk, wenn man die Länge kennt, multipliziert man diesen mit der Länge, und wenn man den Querschnitt kennt, muss man noch durch diesen Querschnitt dividieren.“ (BTR6,324)

(2) Frau Carle: „Ich würde euch jetzt empfehlen, dafür sind jetzt zwei Minuten Zeit, das noch mit WORTEN. Also der Widerstand ist gleich/macht es von mir aus als Gleichung, aber erstmal Worte, die ihr schreibt. Der Widerstand ist gleich?“

Anne: (unverständlich)

Frau Carle: „Der spezifische elektrische Widerstand. Weiter.“

Anne: „Mal“

Frau Carle: „Mal.“

Anne: „Die Länge durch/“

Frau Carle: „Ja. Durch den Querschnitt. Genau so.“ (LRR10, 134-140)

Für das **Ohmsche Gesetz** gibt es insgesamt 38 Textstellen in der Kategorie *Formelsatz mit Termini*. Wie auch in den bereits beschriebenen Kategorien, die den Ebenen I, IIA, IIB zuzuordnen sind, finden sich auch in dieser Kategorien Formulierungen, die äquivalent zu $I \sim U$ sind, während andere äquivalent zu $U \sim I$ sind. Grundsätzlich gibt es drei unterschiedliche Arten, in denen die Proportionalität im Rahmen dieser Erhebung zum Ausdruck gebracht wurde:

- (1) Größe A ist proportional zu Größe B. / Größe B ist proportional zu Größe A.
- (2) Größe A und B sind proportional zueinander.
- (3) substantivische Formulierung: Es liegt eine Proportionalität zwischen A und B vor.

Die folgenden Beispiele sollen diese Varianten illustrieren, alle Beispiele beziehen sich auf die Reihenfolge $I \sim U$, für alle Varianten kommt aber auch die umgekehrte Formulierung vor. Insgesamt wird 23 mal in der Richtung $I \sim U$ und 15 mal in der

Richtung $U \sim I$ formuliert. Am häufigsten werden im hopsitierten Unterricht die unter (1) genannten Formulierungen verwendet (16 von insgesamt 38, also etwa 42%). Die zuerst genannte Formulierung mit „ist“ kommt am häufigsten vor, die anderen Verben werden in der Regel nur von je einer Lehrkraft genutzt. Bei 17 codierten Textstellen (45%) wird die Proportionalität als direkte Proportionalität spezifiziert. Bei allen anderen Formulierungen wird allgemein von Proportionalität gesprochen.

- (1) „Stromstärke ist (direkt) proportional zur Spannung.“ (LRR4, 73 bzw. AWR3, 41) alternativ verwendet ein Lehrer das Verb „steigen“: „Die Stromstärke steigt proportional zur Spannung an.“ (HBG2, 19), eine andere Lehrerin die Formulierung „verhält sich“: „Stromstärke (6 s) verhält sich direkt proportional (14 s) zur Spannung.“ (KTH1, 141) und in einem anderen Fall wird gar kein Verb verwendet: „Stromstärke proportional zur Spannung.“ (LRR5, 36)
- (2) „Stromstärke und Spannung sind direkt proportional zueinander.“ (AWR3, 44)
- (3) „Proportionalität von Stromstärke und Spannung“ (ABG5, 18)

Vergleich der LehrerInnen: Die meisten LehrerInnen sprechen wesentlich häufiger einen Formelsatz mit den Formelzeichen (Kategorie *Formelsatz mit Formelzeichen*, Ebene IIB), statt die Termini auszusprechen (Kategorie *Formelsatz mit Termini*, Ebene III), wie aus Diagramm D.4 im Anhang zu entnehmen ist. Am deutlichsten ist dieser Unterschied bei Herrn Meyer zu erkennen, der 39 mal die Formeln in Ebene IIB und nur 6 mal in Ebene III verbalisiert. Eine sehr deutliche Ausnahme stellt hier Frau Müller dar, bei der 29 mal die Ebene IIB und ganze 39 mal die Ebene III identifiziert werden konnte. In kleinerem Maß ist diese umgekehrte Häufigkeit auch bei Herrn Lenz (9 mal IIB, 11 mal III) und Herrn Weber (2 mal IIB, 13 mal III) zu finden. Durchschnittlich verwendeten die LehrerInnen 18 mal Formelzeichen und 13 mal Termini beim Sprechen der Formeln.

12.2. LehrerInnen wenden Formeln an oder interpretieren Formeln

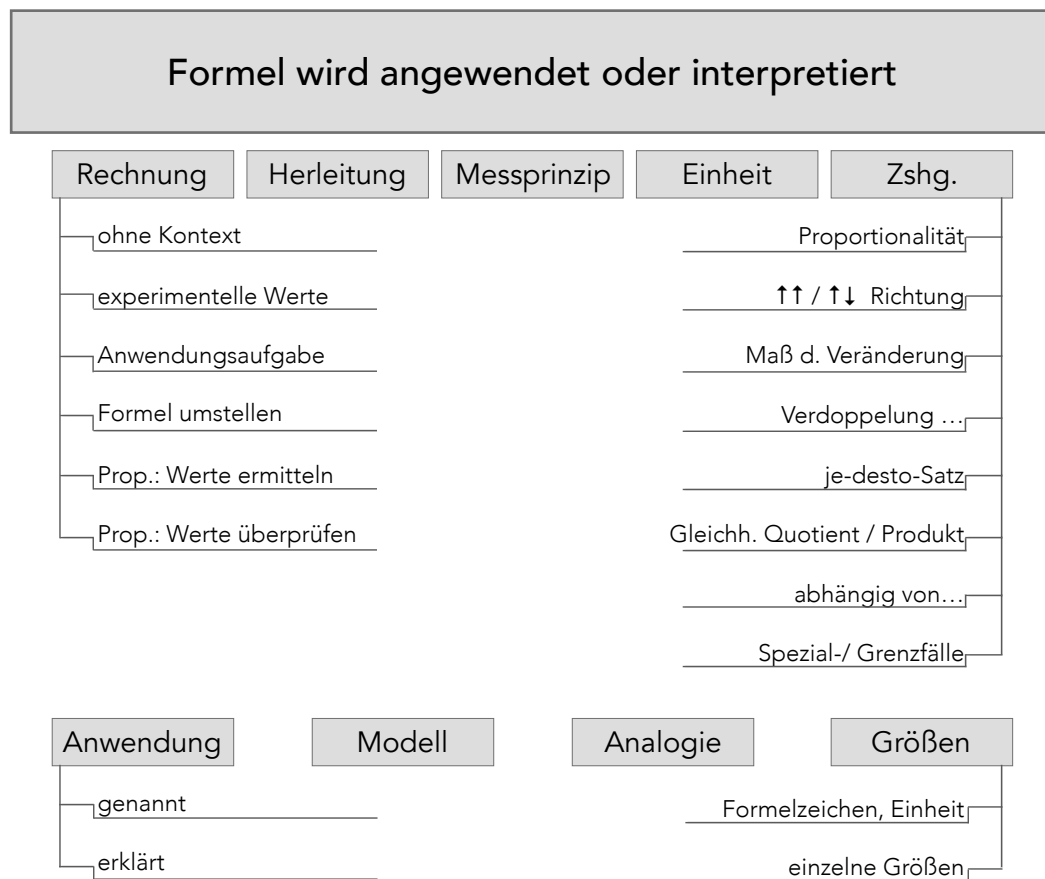


Abbildung 12.8.: Kategorien der Oberkategorie *Formel wird angewendet oder interpretiert*

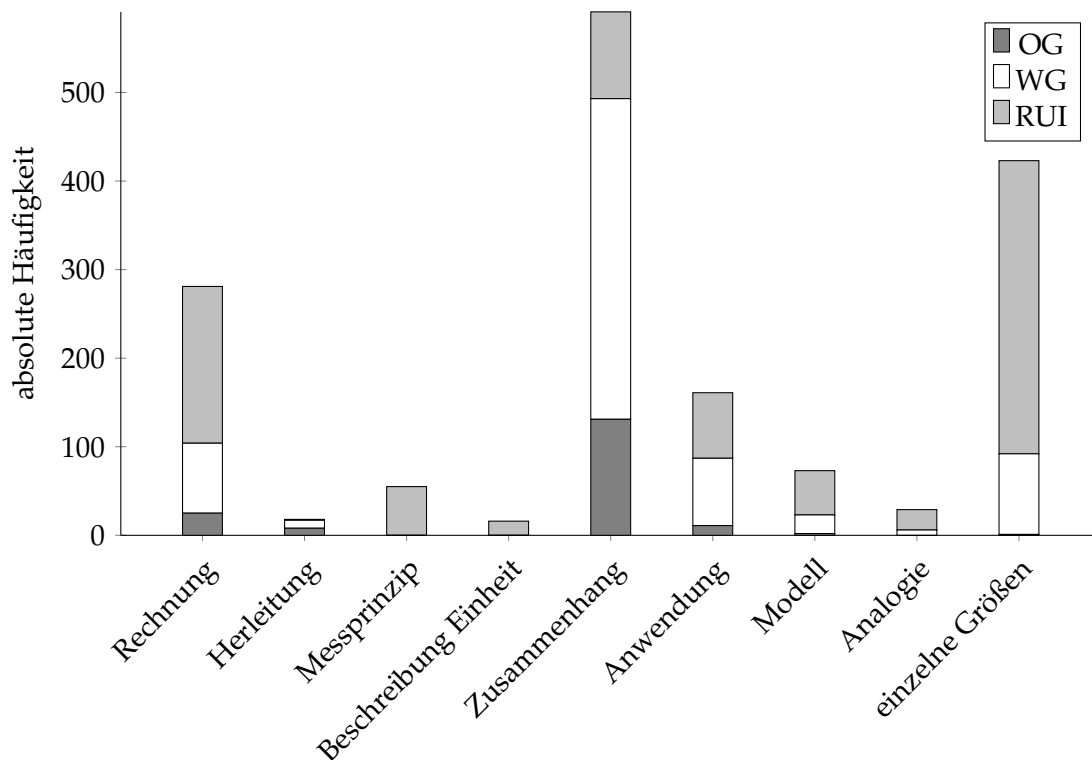
Die Kategorie *Formel wird angewendet oder interpretiert* ist die umfangreichste Oberkategorie des Kategoriensystems. Sie umfasst die in der Abbildung 12.8 dargestellten Unterkategorien, die im folgenden Abschnitt näher beschrieben werden. Die übergeordnete Kategorie *Formel wird angewendet oder interpretiert* zeichnet sich dadurch aus, dass im weitesten Sinne mit einer Formel gearbeitet wird. Während die Oberkategorie *Formel wird gesprochen* eine rein deskriptive Kategorie ist, bei der der Inhalt der Aussagen in jedem Fall die Formel selbst ist und sich die Kategorien durch unterschiedliche Oberflächenmerkmale der Aussagen unterscheiden, ist die Unterscheidung der hier zusammengefassten Kategorien meist inhaltlicher Art. Die Nähe zur Formel und der Einbezug einer Formel in die Aussagen selbst kann dabei sehr unterschiedlich ausfal-

len. So gibt es Kategorien, bei denen der Bezug sehr deutlich ist, beispielsweise wenn eine Formel für eine Rechnung angewendet wird. Ein mittelstarker Bezug zur Formel liegt häufig vor, wenn darüber gesprochen wird, wie sich Größen zueinander verhalten, dass beispielsweise die Stromstärke größer wird, wenn die an einem Stromkreis anliegende Spannung erhöht wird. Bei anderen Kategorien ist der Formelbezug eher implizit vorhanden. Dies trifft insbesondere auf die Kategorien *Modell* und *Analogie* zu. Hierbei werden oft Zusammenhänge erläutert, die durch die Formel ausgedrückt werden, der Bezug zur Formel wird in der Regel aber nicht explizit hergestellt.

Die Häufigkeiten der Kategorien sind in Diagramm 12.9 dargestellt. Es zeigt eine recht heterogene Häufigkeitsverteilung. Ein klarer Schwerpunkt ist bei den Kategorien *Zusammenhang zwischen Größen*, *einzelne Größen* und *Rechnung* zu erkennen. Dies deutet darauf hin, dass eine mathematische Handhabung der Formeln (bei Rechnungen) und mathematische Zusammenhänge zwischen Größen im beobachteten Unterricht eine große Rolle spielen. Zu berücksichtigen ist bei einem Vergleich allerdings auch die unterschiedliche inhaltliche Breite der Kategorien, die durch die Anzahl der Unterkategorien angedeutet wird. Insbesondere die Kategorien *Rechnung* und *Zusammenhang zwischen Größen* weisen zahlreiche Unterkategorien auf und haben eine große Variationsbreite. Diese Häufigkeitsverteilung der Kategorien spiegelt sich auch bei den meisten LehrerInnen wider. Nur bei 4 LehrerInnen (Herr Meyer, Frau Müller, Herr Schmitt und Herr Weber) sind die genannten Kategorien nicht die häufigsten, sondern es scheint ein Schwerpunkt auf den eher inhaltlichen Kategorien *Anwendung*, *Modell*, *Analogie* und *Beschreibung einzelner Größen* zu liegen (vgl. Diagramm D.6 im Anhang).

12.2.1. Rechnung

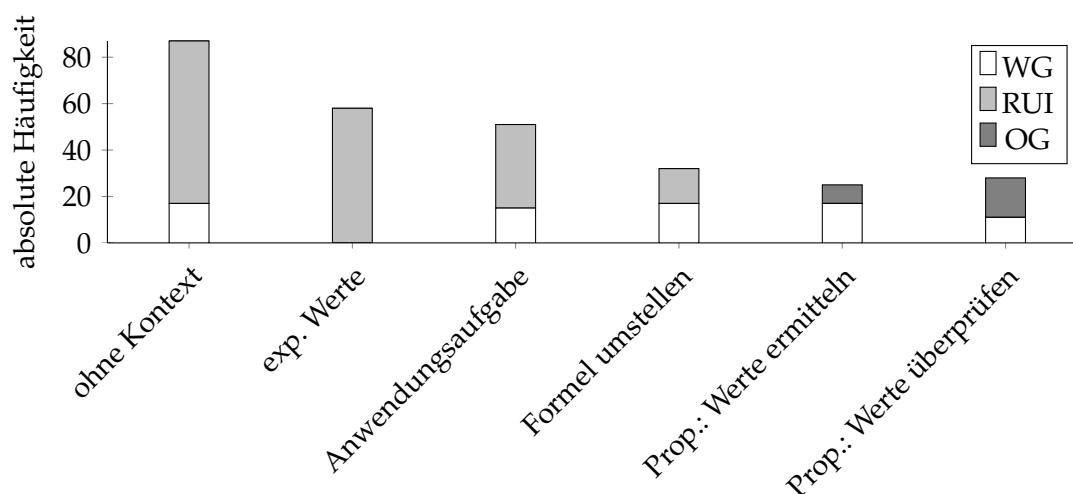
Die Kategorie *Rechnung* umfasst alle Aussagen und Tafelanschriften, bei denen mit einer Formel gerechnet wird. Die Kategorie ist in 6 Unterkategorien aufgeteilt, die sich an der Art der Rechnung orientieren. Die Kategorie umfasst die Unterkategorien *Rechnung ohne Kontext*, *Anwendungsaufgabe*, *Rechnung mit experimentellen Werten*, *Formel umstellen*, *Proportionalität: Werte ermitteln* und *Proportionalität: Werte überprüfen*. Im Diagramm 12.10 ist deutlich erkennbar, dass Rechnungen ohne Kontext im hospitierten Unterricht überwiegen. Da die Rechnungen jeweils im Transkript des Unterrichtsgesprächs und im Tafelbild codiert wurden, kann von der Anzahl der Codierungen nicht direkt auf die Anzahl gemachter Rechnungen geschlossen werden. Jedoch sind die angegebenen Zahlen ein Maß für die Gewichtung der unterschiedlichen Rechnungen innerhalb des Unterrichts. Eine Rechnung, für die eine Aufgabenstellung mündlich besprochen, dann

Abbildung 12.9.: Codehäufigkeiten Kategorien zu *Formel wird angewendet*

die Aufgabe schriftlich an der Tafel gerechnet und dabei noch einmal die konkrete Lösung erklärt wird, nimmt einen höheren Stellenwert im Unterricht ein, als eine Aufgabenstellung, die aus dem Buch übernommen und nicht weiter besprochen wird.

Bei der Häufigkeitsverteilung der Unterkategorien zeigt sich, dass die Kategorie *Rechnung mit experimentellen Werten* nur für die Definitionsformel $R = \frac{U}{I}$ vorkommt. Das Rechnen mit Proportionalitäten kommt jeweils nur für das Widerstandsgesetz und das Ohmsche Gesetz vor. Dies kann dadurch erklärt werden, dass das Ohmsche Gesetz eine Proportionalität der Definitionsformel darstellt. Mit der Formel $R = \frac{U}{I}$ selbst wurde nicht mit Proportionalitäten gerechnet. Die Kategorien *Rechnung ohne Kontext*, *Anwendungsaufgabe* und *Formel umstellen* kommen für die Definitionsformel und das Widerstandsgesetz vor.

Vergleich der LehrerInnen: Betrachtet man die Verteilung der codierten Stellen auf die unterschiedlichen LehrerInnen, so zeigt sich, dass die Kategorie bei allen LehrerInnen relativ häufig vorkommt. Die meisten codierten Stellen sind mit 52 Frau Müller zuzuordnen (was 18% der gesamten Codierungen der Kategorie *Rechnung* ausmacht, bzw. 12% aller Codierungen von dieser Lehrerin). Die wenigsten Codierungen finden

Abbildung 12.10.: Codehäufigkeiten Unterkategorien zu *Rechnung*

sich mit 13 Codierungen bei Herrn Weber (entspricht 4% der Codierungen der Kategorie, bzw. 7% aller Codierungen dieses Lehrers). Betrachtet man den prozentualen Anteil der Codierungen für *Rechnung* an der Kategorie *Formel wird angewendet oder interpretiert* für einzelne LehrerInnen, so kommt diese Kategorie bei Herrn Lenz (35%) und Herrn Funke (27%) besonders häufig vor. Zusammenfassend spielen Rechnungen bei allen LehrerInnen eine wichtige Rolle beim Umgang mit Formeln im Unterricht (vgl. hierzu Diagramme D.7 und Tabelle D.2 im Anhang).

Größere Unterschiede zwischen den LehrerInnen zeigen sich bei der Betrachtung der Verteilung der Unterkategorien. Hier scheint es zwei unterschiedliche Gruppen zu geben: In der ersten Gruppe kommen verschiedene Unterkategorien von *Rechnung* ungefähr gleich häufig vor. Die Formel wird somit für unterschiedliche Rechnungen genutzt. In der zweiten Gruppe gibt es ein oder zwei Unterkategorien, die wesentlich häufiger vorkommen und somit einen Schwerpunkt bei Rechnungen im Unterricht bilden. Bei Frau Müller, Frau Berger und Frau Carle ist dies die Kategorie *Rechnung ohne Kontext*, bei Herrn Funke die Kategorie *Rechnung mit experimentellen Werten* (vgl. Diagramme D.8 im Anhang).

Rechnung ohne Kontext

Als Rechnungen ohne Kontext werden klassische Rechenaufgaben gefasst, die keinen Anwendungsbezug haben und somit in keinen sinnstiftenden Kontext eingebettet sind. Auch Pseudokontexte, die keinerlei Anwendungs- oder Alltagsbezug haben, werden zu dieser Aufgabenart gezählt.

Ein typisches Beispiel ist die folgende, mündlich bearbeitete, Aufgabe zur Berechnung des Widerstandes mit Hilfe der Formel $R = \frac{U}{I}$:

Herr Funke: „Wir haben eine Spannung von zwei Volt und eine Stromstärke von ein Ampere. Gleichung haben wir rechts aufgeschrieben. (5s) Wir würden einfach die zwei Volt durch ein Ampere teilen und kämen auf WAS für einen Widerstand?“ (HBG2, 36-38)

Solche eher informellen Berechnungen, die häufig ohne feste Struktur notiert werden, treten auch im Schriftlichen auf, wenn die SchülerInnen beispielsweise eine Tabelle mit fehlenden Werten vervollständigen sollen. Neben diesen Berechnungen im Unterrichtsverlauf oder in einer Einzelarbeitsphase gibt es auch Aufgaben, die eine Bearbeitung durch die SchülerInnen im klassischen „gegeben-gesucht-Lösung(-Antwortsatz)“-Schema verlangen. Ein Beispiel dafür zeigt das Tafelbild in Abbildung 12.11, bei dem in einer Rechnung der Widerstand eines Drahtes mit Hilfe des Widerstandsgesetzes bestimmt wird.

Ein Draht ($\rho = 1 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$) mit der Querschnittsfläche von $A = 0,5 \text{ mm}^2$ wird in einem Experiment genauer untersucht - Bei einer Spannung von 10 V beträgt die Stromstärke $0,5 \text{ A}$. Berechne die Länge des Drahtes!

$$R = \frac{U}{I} = \rho \cdot \frac{L}{A}$$

geg: $\rho = 1 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$ ges.: L
 $A = 0,5 \text{ mm}^2$
 $U = 10 \text{ V}$
 $I = 0,5 \text{ A}$

Lösung: $R = \rho \cdot \frac{L}{A}$
 $L = \frac{R}{\rho} \cdot A$ $R = \frac{U}{I} = \frac{10 \text{ V}}{0,5 \text{ A}} = 20 \Omega$
 $= \frac{20 \Omega}{1 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}} \cdot 0,5 \text{ mm}^2$
 $= 10 \text{ m}$ Antwortsatz ...

Abbildung 12.11.: Abschrift eines Tafelbilds mit Rechnung zum Widerstandsgesetz (SBG6, TB)

Am abgebildeten Beispiel ist zu erkennen, dass der Antwortsatz nicht an der Tafel formuliert wird. Der Umgang mit Antwortsätzen bei Rechnungen ist bei den beobachteten LehrerInnen sehr unterschiedlich. Einige LehrerInnen verlangen explizit von den SchülerInnen, einen Antwortsatz zu formulieren. Häufig wird der Antwortsatz an der

Tafel jedoch nicht formuliert, sondern, wie im Beispiel, nur angedeutet. Er gehört zum Formalismus, wird aber in seiner Bedeutung nicht explizit reflektiert. Die Rechnung endet damit in vielen Fällen mit der mathematischen Angabe eines Zahlenwertes (z. B. $R = 0,017 \Omega$), der nicht noch einmal in seinen physikalischen Kontext eingebettet wird (s. Kap. 15.1 für eine genauere Analyse des Umgangs mit Antwortsätzen).

Anwendungsaufgabe

Im Gegensatz zu *Rechnung ohne Kontext* werden bei Anwendungsaufgaben Formeln genutzt, um ein Problem aus dem Alltag oder einer (technischen) Anwendung zu lösen, oder klassische Rechenaufgaben sind in einen Kontext eingebettet. Dieser Kontext sollte dabei nach Muckenfuß (1995) sinnstiftend sein (s. Kap. 3.3.4).

Ein typisches Beispiel, das in ähnlicher Form bei fast allen LehrerInnen vorkommt, ist die folgende Anwendungsaufgabe für das **Widerstandsgesetz**. Das Zitat (1) zeichnet sich dadurch aus, dass der Kontext hier durch die lebhaft erzählte Erzählung des Lehrers besonders betont wird. Oft wird der Kontext auch nur genannt oder einer kurzen Textaufgabe aus dem Buch entnommen (s. Zitat (2)).

(1) Herr Jasper: „Ein Anwendungsbeispiel für das Widerstandsgesetz. (...) Wie man es regelmäßig in den Nachrichten liest. Irgendwas wurde neu gebaut. Irgendwas wurde fertiggestellt. Und bei der Eröffnung stellt man fest, noch vor Inbetriebnahme der Brandschutzanlage, wie auch immer, strahlt ja, alles frisch gemacht. Unterbett neu. Frisch asphaltiert. Infrastruktur in die Straße reingebaut. Kanalisation. Die läuft Gott sei Dank. Aber Mist. Stromkabel geht nicht. Jetzt hätten die eine Möglichkeit. Die könnten jetzt sagen: wir fangen hier vorne an zu graben und [macht Geräusch von Bohrerhammer nach] buddeln flink und wir buddeln uns durch und gucken, wo das Kabel kaputt ist. Da hat natürlich der Straßenbauer was dagegen. Die sagen: Nein, jetzt haben wir das gerade alles frisch geteert. Das muss auch anders gehen. Und wie kann man jetzt mit Hilfe des Widerstandsgesetzes versuchen, die Stelle etwas zu LOKALISIEREN?“ (AGB5, 135)

(2) Herr Schmitt: „Nummer NEUN. Eine unterirdisch verlegte zweiadrige Telefonleitung aus Kupfer, Querschnittsfläche gegeben, ist beschädigt, so dass die beiden Adern berühren. In welcher Entfernung muss GEGRABEN werden, wenn der Widerstandsmesser Sechs Komma Fünf Ohm anzeigt?“ (SSG9, 75-93) ⁵

⁵Die ausführlichen Zitate mit Besprechung der Lösungen der Aufgabe finden sich im Anhang unter D.6.1

Beide Lehrer reflektieren nach der Berechnung der vorläufigen Lösung ($l = 191,2\text{ m}$) beziehungsweise der Besprechung des theoretischen Vorgehens bei der Lösung der Aufgabe noch einmal den Kontext, um gemeinsam mit den SchülerInnen zu ermitteln, dass diese vorläufige Länge noch einmal durch zwei geteilt werden muss, um von der Kabellänge (entspricht Hin- und Rückleitung des Stromkabels) auf die Position des Kabelbruchs zu kommen. Dieses Vorgehen wird von der Aufgabenstellung auf gewisse Art provoziert, da über die tatsächliche Bedeutung der Länge l in der Formel $R = \rho \cdot \frac{l}{A}$ im Kontrast zur gefragten Strecke reflektiert werden muss.

Für die **Definitionsformel** $R = \frac{U}{I}$ sind die Anwendungsaufgaben häufig derart, dass berechnet werden soll, mit welcher Spannung ein Bauteil oder elektrisches Gerät betrieben werden darf, wenn es für bestimmte Stromstärken zugelassen und der Widerstand bekannt ist (Zitat (1)). In einigen Fällen muss die benötigte Größe der Stromstärke erst über die angegebene elektrische Leistung bestimmt werden, wie Zitat (2) verdeutlicht. In vielen weiteren Fällen ist die Berechnung des Widerstandes über die Formel $R = \frac{U}{I}$ eingebettet in eine übergeordnete Aufgabe zum Widerstandsgesetz. Ein Beispiel hierfür stellt das Zitat (3) dar.

(1) Frau Müller: „Auf einer Spule (8 s) befinden sich die Angaben, [...] drei Ampere Komma zwei Ohm. (5 s) Frage? (7 s) Mit welcher Spannung (...) darf die Spule (6 s) betrieben werden?“ (BTR3, 48)

(2) Frau Berger: „Ein Projektor ist an eine Spannungsquelle von 230 V angeschlossen. Die in ihm eingebaute Lampe hat die Kenndaten 75 V / 375 W. Berechne die Größe des erforderlichen Vorwiderstandes.“ (AWR6, TB)

(3) Herr Jasper: „Man könnte auch, das ist MEIN Weg hier, diese Formel nach U umstellen. Also U ist R mal I . Dann dieses R hier einsetzen und dann ausrechnen. (...) Und wir würden auf eine Spannung kommen, die einem Wert von 29 Volt entspricht. DAS heißt, wenn auf der Baustelle der (Poliervorarbeiter?) wie auch immer, so NAIV wäre und würde sagen, ich nehme eine haushaltsübliche Verlängerungsschnur mit der Länge 650 Metern. (unv.), weil es eben physikalisch keinen Sinn macht, aber rein theoretisch, dann hätte ich ALLEINE nur aufgrund dieses Kabels und dieser Kabellänge einen Spannungsverlust von 29 Volt.“ (ABG6, 54) ⁶

⁶ausführliches Zitat im Anhang unter D.6.1

Rechnung mit experimentellen Werten

Im beobachteten Unterricht werden zahlreiche Experimente gemacht. Wenn im Nachgang zu den Experimenten die in Schüler- oder Demonstrationsexperimenten ermittelten Messwerte in eine Formel eingesetzt werden, um eine weitere Größe rechnerisch zu ermitteln, werden diese Rechnungen als *Rechnung mit experimentellen Werten* verstanden. Im analysierten Datenmaterial werden experimentell ermittelte Werte nur in die **Definitionsformel** $R = \frac{U}{I}$ eingesetzt. Es gibt keine Rechnung mit experimentellen Werten für das Widerstandsgesetz, obwohl es zum Beispiel auch denkbar wäre, die Länge eines Drahtes zu messen und so auch beim Widerstandsgesetz mit experimentellen Werten zu rechnen.

In der Regel wird experimentell die Spannung über einem Bauteil und die Stromstärke vor oder hinter einem Bauteil gemessen und daraus über die Formel $R = \frac{U}{I}$ der zugehörige elektrische Widerstand eines Bauteils berechnet. In vielen Fällen ist dies eingebettet in Experimentierreihen zur Erarbeitung des Widerstandsgesetzes, wenn beispielsweise die Abhängigkeit des Widerstandes von der Länge untersucht wird, wie in Zitat (1). Häufig wird bei mündlich besprochenen Aufgaben die Rechnung selbst nicht verbalisiert, sondern nur die gegebenen Werte und der berechnete Wert, wie das Beispiel (2) zeigt. Zitat (3) stellt ein Beispiel dar, in dem die Rechnung konkret mitgesprochen wird. Am Zitat (3) wird auch deutlich, dass SchülerInnen häufig die Einheiten nicht mitsprechen. In diesem Fall ergänzt der Lehrer, Herr Lenz, die Einheit kommentarlos (s. dazu auch die Betrachtungen zu den Einheiten in Kap. 15).

(1) Frau Müller: „So jetzt haben wir gesagt, wir wollen ja untersuchen, ob dieser Widerstand, den ich da berechne, sich verändert, wenn ich mit dem Leiter was mache. Die eine Gruppe ersetzt also dann das Material und die andere Gruppe ersetzt die Länge eines Leiters durch eine neue Länge und wieder durch eine neue Länge zum Beispiel. Und jedes Mal müssen sie dann gucken, wie groß ist Spannung und Stromstärke und dann dazu den Widerstand berechnen.“(BTR5, 16)

(2) Herr Jasper: „Wir (7 s) messen Stromstärke und Spannung für die ZWEITE Glühlampe in unserem Experiment (...). Also die Glühlampe, die geleuchtet hat, L-zwei (6 s). Auch hier müssen wir wieder ablesen. (...) Spannung in dem Falle.“

Anna: „(Fünf Komma Vier Volt)“

Herr Jasper: „Jawoll. (15 s) Stromstärke? (8 s) Ist knapp unter Null Komma Eins, wenn wir genau von vorne ablesen sind es die Null Komma Null

Neun. (8 s) Oder neunzig Milliampere. (5 s) Jann?"

Jann: „Sechzig Ohm“(ABG1, 78-81)

(3) Herr Lenz: „Okay. Wir drehen mal zunächst hoch auf ungefähr zwei Volt.

(...) Was wird uns für eine Stromstärke bei ungefähr zwei Volt angezeigt?

Also GROB gerundet. Es reichen uns jetzt ganz grobe Werte. Null Komma

Eins. (...) Der Widerstand, mal im Kopf ausgerechnet, ist ungefähr wie groß?

Zwei Volt durch Null Komma Eins Ampere?“(HBG2, 137)

Eine weitere Variante ist die Berechnung des Widerstandes von SchülerInnen in Experimentierphasen. Hier werden die entsprechenden Werte häufig direkt in den Taschenrechner eingegeben und lediglich das Ergebnis der Rechnung in einer entsprechenden Messwerttabelle eingetragen (s. Abb. 12.12).

Glühlampe		
U	I	
0	0	
1,71	0,11	15,55
2,40	0,24	10,00
3,30	0,30	11,00
4,51	0,36	12,53

Abbildung 12.12.: Abschrift eines Tafelbildausschnittes mit Rechnung zum Widerstand im Rahmen eines Schülerexperimentes (EPR3, TB)

Die Beispiele zeigen sehr deutlich, dass die Formel bei der Berechnung experimenteller Werte mehr oder weniger stark im Vordergrund stehen kann. Sie kann von der Lehrkraft implizit angesprochen werden, wie in Zitat (1), mit eingesetzten Werten gesprochen werden, wie in Zitat (2) oder in einer Messwerttabelle vollständig oder unvollständig notiert werden. Bei allen Beispielen steht der formale Rechenweg im Gegensatz zu vielen anderen Rechenaufgaben im Hintergrund. Die LehrerInnen legen hier keinen Wert auf das sorgfältige Notieren der gegebenen und gesuchten Werte und ausführlichem Einsetzen. Der Schwerpunkt liegt hier eher auf der pragmatischen Handhabung der Formel, um einen gesuchten Wert zu erhalten. Oft wird dann nur dieser berechnete Wert notiert.

Formel umstellen

Innerhalb einer Rechnung kann von SchülerInnen verlangt werden, dass sie eine Formel umstellen, oder die Lehrkraft selbst stellt an der Tafel eine Formel um. Da dies eine besondere Art des Arbeitens mit einer Formel ist, werden diese Stellen zusätzlich zu der sie umgebenden Rechnung codiert als *Formel umstellen*.

Die Art und Weise, in der das Umstellen von Formeln thematisiert, erklärt oder geübt wird, zeigt eine sehr große Variationsbreite, wie die folgenden Beispiele für die **Definitionsformel** verdeutlichen. In einigen Fällen wird das Umstellen selbst gar nicht weiter erklärt, wie die Methode des „scharf Anguckens“ im Zitat (1) von Herrn Jasper deutlich macht. In anderen Fällen wird das Umstellen der Formel gründlich gemeinsam besprochen, wie im Zitat (2) von Herrn Lenz, das sich auch im Tafelbild zur Stunde, das im Anhang in Abb. D.24 zu finden ist, widerspiegelt. Er lässt die Formel explizit nach der Spannung U und der Stromstärke I umstellen, zugehörige je-desto-Sätze formulieren und eine Beispielaufgabe rechnen. Damit betont er implizit die Wichtigkeit des Umstellens von Formeln und deutet ihre veränderte Bedeutung nach dem Umstellen durch die unterschiedlichen je-desto-Sätze an. Anwendungen werden durch diese Aufgabe nur impliziert, da nicht konkret besprochen wird, für welche Problemstellung die umgestellte Formel benötigt wird.

(1) Herr Jasper: „ R ist gleich U durch I . Wird nach U umgestellt und die umgestellte Gleichung klappt. (...) Wollen wir mal ganz scharf angucken. Tom!“

Tom: „Vielleicht R mal I ?“

Herr Jasper: „Jawoll.“(ABG1, 95-97)⁷

(2) Herr Lenz: „WELCHEN mathematischen Schritt müssen wir gehen, um von der Gleichung für den Widerstand auf die Gleichung für die Spannung zu kommen?“

Anne: „Mal Stromstärke und dann ist U ist gleich R mal I .“

Herr Lenz: „Genau. (...) Wir müssen auf BEIDEN Seiten mal I rechnen.“

mehrere SchülerInnen: „ U ist gleich R mal I “

Herr Lenz: „Natürlich. Immer gut, wenn Schüler aufpassen. (5 s) Auf beiden Seiten mal I , dann haben wir auf der einen I mal R stehen, auf der anderen U durch I mal I und die Stromstärke kürzt sich auf dieser Seite raus.“(HBG2, 43-47)

Das Umstellen von Formeln tritt auch für das **Widerstandsgesetz** auf, wie das Beispiel im Tafelbild (Abb. 12.13) zeigt. Hier wird das Umstellen von Formeln nur impliziert, indem direkt die fertig umgestellte Formel neben die Grundformel geschrieben wird. In diesem Fall notiert der Lehrer eine Nebenrechnung an einer zweiten Tafel,

⁷ ausführliches Zitat im Anhang unter D.6.1

Wie lang muss ein Kupferdraht sein, damit er bei einem Querschnitt von 2 mm^2 einen Widerstand von 55Ω hat?

gegeben: $R = 55 \Omega$
 $A = 2 \text{ mm}^2$
 $\rho = 0,017 \Omega \text{ mm}^2 / \text{m}$

gesucht: Länge l in m

Lösung: $R = \rho \cdot (l / A)$ $l = (R \cdot A) / \rho$
 $l = (55 \Omega \cdot 2 \text{ mm}^2) / 0,017$
 $l = 6470,58 \text{ m}$

 Ergebnis: Der Kupferdraht muss eine Länge von wenigstens 6471 m haben.

WB: $R = \rho \cdot \frac{l}{A}$
 $55 \Omega = 0,017 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \cdot \frac{(l)}{2 \text{ mm}^2}$
 $\frac{2 \text{ mm}^2 \cdot 55 \Omega}{0,017 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}} = l$ $\frac{2 \cdot 55}{0,017} \frac{\text{mm}^2 \cdot \Omega}{\Omega \cdot \text{mm}^2} \text{ m} \Rightarrow \text{m}$

Abbildung 12.13.: Abschrift eines Tafelbilds mit dem Umstellen des Widerstands-gesetzes mit eingesetzten Werten (EPR10, TB)

in der er nach dem Einsetzen der Größen unter Zuhilfenahme der entsprechenden Einheiten die Formel umstellt und das Ergebnis über die Einheiten validiert (s. auch das entsprechende Unterrichtstranskript im Anhang unter Kap. D.6.1). Im Transkript und im Tafelbild (Abb. 12.13) zeigt sich, dass der Lehrer im Beispiel für das Tafelbild bewusst die Variante wählt, die Größen zunächst einzusetzen und im Anschluss daran nach der letzten verbliebenen unbekannten Größe (hier: l) umstellt. Das Umstellen der Formel geschieht als Nebenrechnung am Whiteboard (Abschnitt unter der gestrichelten Linie), während die restliche Rechnung an der interaktiven Tafel notiert wird, und ist an die Einheitenkontrolle gekoppelt. Im eigentlichen Tafelbild, das die SchülerInnen abschreiben, wird die Formel direkt in umgestellter Form notiert.

Vergleich der LehrerInnen: Es zeigt sich somit, dass die hospitierten LehrerInnen sehr unterschiedlich mit dem Thema Umstellen von Gleichungen umgehen. Bei den meisten LehrerInnen kommt das Umstellen von Formeln nur ein einziges Mal vor, sodass das Thema allgemein eine eher untergeordnete Rolle zu spielen scheint, aber bei fast allen LehrerInnen vorkommt. Eine Ausnahme stellt der oben zitierte Herr Lenz dar. Bei ihm wurden insgesamt 11 Stellen gefunden, bei denen das Umstellen von Formeln thematisiert oder durchgeführt wird (vgl. auch Diagramme D.8 im Anhang).

Proportionalität: Werte ermitteln

Neben dem klassischen Einsetzen bekannter Größen in eine Formel, um eine unbekannte Größe zu erhalten, treten im beobachteten Unterricht zwei Aufgabenformate auf, die sich nur implizit auf eine Formel beziehen: Die in der Formel vorkommenden Größen werden mit direkten oder indirekten Proportionalitäten miteinander in Beziehung gesetzt. Diese Proportionalitäten werden dann im ersten Aufgabenformat genutzt, um unbekannte Werte zu ermitteln.

Das Arbeiten mit Proportionalitäten ist damit eine Art Explorieren der Größenverhältnisse der in der Formel vorkommenden Größen. Durch Ausprobieren der Art „Wie verändert sich eine abhängige Größe, wenn ich eine andere verändere“, können SchülerInnen ein besseres Gefühl für den Zusammenhang der Größen in der Gleichung entwickeln (vgl. auch das von Lehavi *et al.* (2019) identifizierte Exploration-Patter, s. Kap. 3.3.3). In diesem Fall geschieht das Explorieren mit konkreten Zahlenwerten. Die Kategorie ist somit eng verwandt mit der Kategorie *Zusammenhang zwischen Größen - Proportionalität*, ist aber weniger abstrakt, da mit konkreten Werten gearbeitet wird.

Das Diagramm 12.10 zeigt, dass die Kategorie *Proportionalität: Werte ermitteln* nur für das Ohmsche Gesetz und das Widerstandsgesetz vorkommt. Da das Ohmsche Gesetz mit der Formel $R = \frac{U}{I}$ eng verwandt ist, könnten die Aufgaben zum Ohmschen Gesetz, die unter Proportionalität eingeordnet wurden, auch als Arbeiten mit Proportionalitäten der Formel $R = \frac{U}{I}$ eingestuft werden. Das Ohmsche Gesetz wird jedoch im beobachteten Unterricht zeitlich und inhaltlich weitestgehend unabhängig von der Definitionsformel für den Widerstand behandelt. Daher werden die hier codierten Aufgaben alle ohne Bezug zur Definitionsformel bearbeitet und dementsprechend dem Ohmschen Gesetz zugeordnet. Dies erklärt das Fehlen von Aufgaben mit Proportionalitäten für die Formel $R = \frac{U}{I}$, während diese Aufgabenart beim Widerstandsgesetz häufig auftritt.

Insbesondere beim Widerstandsgesetz wird diese Art der Rechnung genutzt, um die Gleichung mathematisch zu erkunden, wie das folgende Beispiel verdeutlicht.

Frau Müller: „Und jetzt müssen wir nicht probieren, jetzt müssten wir eigentlich wissen, wie groß der Widerstand jetzt sein muss. Guck mal, am Anfang ist er Null Komma Ein Quadratmillimeter und dazu gehören 28 Ohm und jetzt haben wir EINEN Quadratmillimeter. Das Wievielfache ist es denn geworden? (...) Die Mathematik. (...) Ok, dann sagen wir ihr das.“

Tom: (unverständlich)

Frau Müller: „Das Wievielfache wollten wir erstmal wissen.“

Tom: „Zehnfache.“

Frau Müller: „Das war das Zehnfache. Null Komma Eins mal Zehn ergibt die Eins. Wir haben jetzt also den Querschnitt um das ZEHNFACHE vergrößert. Und das heißt, der Widerstand muss sich natürlich um den zehnten Teil verringern, also sprich Zwo Komma Acht. Genau.“ (BTR6, 172-176)

Hier untersucht Frau Müller gemeinsam mit den SchülerInnen, wie sich der Widerstand verändert, wenn der Querschnitt zehnfach vergrößert wird. Im weiteren Verlauf des Unterrichtsgesprächs wird auch die Veränderung des Widerstandes in Abhängigkeit der Länge thematisiert, wie das zugehörige Zitat im Anhang unter D.6.1 verdeutlicht.

Die zwei Fälle zeigen deutlich, dass die Werte mit Hilfe der Proportionalitäten ermittelt werden. Die Verknüpfung mit der Formel, beispielsweise indem die Proportionalitäten als Zwischenschritt explizit aus der Formel abgeleitet werden, bleibt in allen relevanten Unterrichtsstellen aus. Beim Ohmschen Gesetz ist dies der Tatsache geschuldet, dass das Ermitteln von Werten mit den Proportionalitäten in der Regel vor der Einführung der Formel $R = \frac{U}{I}$ geschieht. Beim Widerstandsgesetz wird die Formel jedoch in den meisten Fällen vorher eingeführt.

Vergleich der LehrerInnen: Für das Ohmsche Gesetz kommt die Kategorie *Proportionalität: Werte ermitteln* nur bei 3 LehrerInnen vor (Frau Müller, Frau Gerber und Herr Meyer), alle drei LehrerInnen unterrichten an Mittelschulen. Für das Widerstandsgesetz sind die codierten Textsegmente auf mehrere LehrerInnen verteilt, die jedoch auch vorrangig der Mittelschule zuzuordnen sind (vgl. Diagramm D.9 im Anhang). Dies spricht dafür, dass die Kategorie beim Widerstandsgesetz und insbesondere an Mittelschulen eine wichtigere Rolle spielt, was zum einen darauf zurückzuführen werden könnte, dass das Widerstandsgesetz in allen hospitierten Unterrichtssequenzen aus experimentell ermittelten Proportionalitäten hergeleitet wird, wodurch Proportionalitäten eine große Präsenz im Unterricht haben, zum anderen wird an der Mittelschule die Formel $R = \rho \cdot \frac{l}{A}$ laut sächsischem Lehrplan nicht obligatorisch gefordert, sodass das Rechnen mit Proportionalitäten für einige LehrerInnen die einzige Möglichkeit ist, Werte rechnerisch zu ermitteln. Betrachtet man alle Formeln, lässt sich die Kategorie bei 7 von 10 LehrerInnen identifizieren.

Proportionalität: Werte überprüfen

Mit Hilfe von Proportionalitäten werden in anderen Fällen gegebene Werte daraufhin überprüft, ob sie zu dem in der Formel dargestellten Zusammenhang passen. Dies geschieht entweder durch die Überprüfung, ob sich die Wertepaare gleich oder invers verhalten, wie das Beispiel (1) illustriert, oder indem die Quotienten beziehungsweise Produktgleichheit der Wertepaare überprüft wird (Beispiel (2)). Für das Ohmsche Gesetz existiert außerdem noch die graphische Überprüfung anhand eines Diagrammes.

Diese Kategorie ist eng verwandt mit der zuletzt beschriebenen *Proportionalität: Werte ermitteln*. Hier steht jedoch weniger eine Exploration der Zusammenhänge im Vordergrund, sondern mehr der Werkzeugcharakter der Formel: Die Proportionalitäten werden dafür genutzt, häufig experimentell ermittelte Werte mit der Theorie abzugleichen. An einigen Stellen wird dabei nicht explizit mit der Proportionalität der Werte argumentiert, sondern untersucht, ob sich Wertepaare jeweils gleich oder invers verhalten, wie das folgende Beispiel zeigt:

(1): Frau Berger: „So, dann bleibt: Dreifache Länge, wird der Widerstand? Neele.“

Neele: „Dreifach.“

Frau Berger: „Na dreifach. (Wenn die Messwerte?)/ Bei den meisten haben das die Messwerte so (...) hergegeben.“ (AWR5, 86-88)

Häufig wird an späterer Stelle im Unterricht expliziert, dass die Größen somit proportional zueinander sind. Im folgenden Beispiel betont die Lehrerin auch noch einmal, dass auch die Quotientengleichheit zutreffen müsste, diese aber nicht überprüft wird:

(2): Frau Berger: „[...] Könnt ihr das mit euern Messwerten bestätigen, dass Widerstand und Länge direkt proportional zueinander sind? Anne!“

Anne: „Ja.“

Frau Berger: „Jawoll. Dreifacher Widerstand/ Dreifache Länge, dreifacher Widerstand. Da haben wir doppelte Länge, doppelter Widerstand. Weiter wird das jetzt nicht untersucht. Wie beim Ohmschen Gesetz, wo wir wirklich so dem QUOTIENTENGLEICHHEIT erarbeitet haben, passiert jetzt hier nicht. Es ist euch jetzt hiermit mitgeteilt.“ (AWR5, 103-105)

Wie bei Kategorie *Proportionalität: Werte ermitteln* gibt es auch hier keine Codierungen für die Definitionsformel des Widerstandes, für das Ohmsche Gesetz und das

Widerstandsgesetz gibt es in etwa gleich viele relevante Unterrichtsstellen (vgl. Diagramm 12.10). Die Kategorie tritt wie bereits *Proportionalität: Werte ermitteln* bei 7 von 10 LehrerInnen auf, auch hier ist die Verteilung für das Widerstandsgesetz breiter als für das Ohmsche Gesetz: bei letzterem kommt die Kategorie nur bei 4 LehrerInnen vor (vgl. Diagramm D.10 im Anhang).

Für das **Ohmsche Gesetz** gibt es zwei Ausprägungen dieser Kategorie: die graphische und die rechnerische Überprüfung, ob zwei Größen sich zueinander proportional verhalten. Die Überprüfung im Diagramm („Liegt eine Ursprungsgerade vor?“) kommt nur beim Ohmschen Gesetz, nicht beim Widerstandsgesetz vor. Für das Ohmsche Gesetz sind beide Ausprägungen etwa gleich häufig zu finden. Die rechnerische Überprüfung kann ähnlich wie beim Widerstandsgesetz geschehen, wie das Zitat (3) zeigt. Die rechnerische Überprüfung mittels Quotientengleichheit hingegen findet nur für das Ohmsche Gesetz, nicht für das Widerstandsgesetz statt. Insgesamt wurde acht mal die Quotientengleichheit überprüft. Das Zitat (4) ist ein Beispiel hierfür. Die graphische Überprüfung erfolgt in den neun gefundenen Stellen unterschiedlich ausführlich. Einige Stellen sind sehr knapp, wie das Zitat (5) zeigt⁸.

(3) Frau Müller: „Das OHMSCHE Gesetz gilt NICHT. Wir können also nicht NUR die ersten zwei Paare betrachten und dann die letzten völlig außer Acht lassen, sondern WENN wir eine Entscheidung treffen, müssen wir natürlich ALLE Wertepaare anschauen. Und da stellen wir sehr schnell fest, dass hier hinten das, was hier vorne gilt, nämlich Verdopplung beider Größen, hier nicht mehr passt. DAS verdoppelt sich, aber DAS wohl nicht. Also HIER gilt das Ohmsche Gesetz nicht. Begründung ist: Weil wegen mir, was Tim gesagt hat, dann Strom bei den acht Volt sechshundert Milliampere stehen MÜSSTEN.“ (BTR2, 97)

(4) Frau Berger: „Richtig. Was ich muss aber noch machen oder sagen wir, wenn wir ganz sicher gehen wollen, sollten wir das Ganze noch rechnerisch überprüfen. Direkte Proportionalität bedeutet Quotientengleichheit. Also hatten ihr die Haus/ die Aufgabe, die letzte Spalte in der Tabelle zu vervollständigen, indem ihr den Quotienten U durch I berechnet. [...] Schaut euch den Quotienten in der letzten Zeile genau an. Können wir dort einen Pfeil in irgendeine Richtung machen? (...) Nein. Warum nicht, Jacob?“

Jacob: (unv.)

Frau Berger: „Weil die Werte fast alle gleich sind. Richtig.“ (AWR3, 27-29)

⁸Im Anhang unter D.6.1 findet sich noch eine sehr ausführliche Unterrichtspassage hierzu.

(5) Frau Müller: „Da gilt das Ohmsche Gesetz nicht. Genau. Ist keine Gerade durch den Koordinatenursprung.“ (BTR2, 154)

12.2.2. Herleitung der Formel

Die Kategorie *Herleitung* kommt insgesamt nur sehr selten vor. Sie wurde acht mal für das Ohmsche Gesetz, neun mal für das Widerstandsgesetz und nur einmal für die Formel $R = \frac{U}{I}$ codiert. Eine Herleitung ist dabei immer ein induktives Einführen der Formel, bei dem durch Experimente der Zusammenhang zwischen verschiedenen Größen untersucht wird und anschließend die erhaltenen Zusammenhänge durch mathematische Überlegungen in einer Formel zusammengefasst werden. Denkbar wäre auch, eine Formel aus gegebenen anderen Formeln zusammenzusetzen. Dies ist im hospitierten Unterricht nicht passiert und bietet sich bei den untersuchten Formeln und in der hospitierten Klassenstufe auch weniger an.

Das Ohmsche Gesetz wird bei 7 von 10 LehrerInnen hergeleitet. Dies geschieht bei allen LehrerInnen auf die gleiche Art: Es werden experimentell Werte für die Stromstärke in Abhängigkeit der Spannung, beispielsweise an einem Konstantendraht, aufgenommen. Diese werden anschließend in einen Graphen eingetragen und aus dem Graph heraus wird auf eine Proportionalität zwischen den beiden Größen geschlossen, wie das folgende Beispiel illustriert:

Herr Funke: „DIESE Gerade GEHT durch den Koordinatenursprung. DESHALB, weil es eine Gerade ist UND diese durch den Koordinatenursprung geht, können wir sagen, dass Stromstärke und Spannung DIREKT proportional zueinander sind.“ (SBG2, 81)

Das Widerstandsgesetz leiten 5 LehrerInnen her. Da das Widerstandsgesetz an der Mittelschule laut sächsischem Lehrplan nicht verpflichtend vorgesehen ist, führen drei der sechs Mittelschul-LehrerInnen das Widerstandsgesetz nicht ein, sondern arbeiten nur mit den Proportionalitäten (Frau Carle, Frau Gerber und Herr Weber). Herr Lenz schließt von den Proportionalitäten direkt auf die Formel, ohne dass er dies begründet. Bei Herrn Meyer liegt ein spezieller Fall vor: Er führt das Widerstandsgesetz nicht ein, verlangt aber, dass die SchülerInnen damit rechnen können, indem sie es aus dem Tafelwerk herausuchen. Bis auf zwei LehrerInnen haben somit alle an der Erhebung beteiligten LehrerInnen, die mit dem Widerstandsgesetz arbeiten, dieses auch hergeleitet. In allen Klassen werden die Abhängigkeiten des Widerstandes von Länge, Querschnittsfläche und Material experimentell untersucht und als Ergebnis der Experimente Proportionalitäten, beziehungsweise eine Materialabhängigkeit festgestellt.

Diese werden dann im Widerstandsgesetz zusammengefasst, wie das folgende Beispiel und das zugehörige Tafelbild zeigen (s. Abb. 12.14):

Herr Schmitt: „ R ist also proportional zu l und R ist proportional zu Eins durch A . Also indirekt proportional zur Fläche. Daraus ERGIBT sich (...), dass R proportional (...) zu l durch A ist. (10 s) So und von WAS war der Widerstand NOCH abhängig, außer von der Länge und der Querschnittsfläche? (...) Max!“

Max: „Noch vom Material.“

Herr Schmitt: „Richtig. Es gibt eine Materialkonstante, (15 s) die uns also hier (6 s) dann die Formel wiedergibt. Und das ist das Widerstandsgesetz, jetzt haben wir es also HIER (8 s) endlich darliegen.“ (SSG8, 38-40)

Zusammenfassung

$$\left. \begin{array}{l} R \sim l \\ R \sim \frac{1}{A} \end{array} \right\} R \sim \frac{l}{A}$$

Widerstandsgesetz	$R = \rho \cdot \frac{l}{A}$	TW S. 114
ρ ... Spez. elek. Widerstand TW S. 114 l ... Länge des Leiters A ... Querschnittsfläche		

Abbildung 12.14.: Abschrift eines Tafelbilds mit Herleitung des Widerstandsgesetzes (SSG8, TB)

Die **Definitionsformel** des Widerstandes $R = \frac{U}{I}$ wird von allen Gymnasiallehrern einfach vorgegeben, indem sie zur Einführung der Größe elektrischer Widerstand präsentiert wird. Dies wird beispielsweise damit kommentiert, dass man den Widerstand berechnen kann („Wir BERECHNEN den Widerstand, indem wir die Spannung durch die Stromstärke teilen.“ SSG3, 59).

Bei den hospitierten LehrerInnen in der Mittelschule wird bei der Einführung des Widerstandes häufig noch einmal auf das Ohmsche Gesetz Bezug genommen. Sehr ausführlich geschieht dies bei Frau Müller. Zunächst zeigt sie in einem qualitativen Experiment, dass zwei unterschiedliche Glühlampen an der gleichen Spannungsquelle unterschiedliche hell leuchten. Die Helligkeit nimmt sie als Maß für die Stromstärke und schlussfolgert, dass die Lampen den elektrischen Strom unterschiedlich gut leiten. Anschließend nimmt sie zwei Messreihen für die Stromstärke in Abhängigkeit der Spannung an den zwei Glühlampen auf und vergleicht die graphische Auswertung.

Daraus leitet sie ab, dass bei einem Bauteil die Stromstärke zu einer festen Spannung jeweils größer ist („Wenn man eine bestimmte Spannung nimmt und dann die zwei Stromstärken vergleicht, ist immer Bauelement Eins größere Stromstärke.“ BTR2, 292). Dann lässt sie den Quotienten $\frac{U}{I}$ berechnen und führt diesen als Maß für den Widerstand ein:

Frau Müller: „Wir hatten vermutet, beim zweiten Bauelement wird der Strom stärker behindert. Und diese Zahl, die wir jetzt errechnet haben, dieser Quotient, ist ja auch GRÖSZER als bei Bauelement Eins. Und deswegen eignet sich DIESER Quotient, U geteilt durch I , um festzustellen, ob ein Widerstand GROSZ oder KLEIN ist. Weil wir sehen, dass dieser Quotient umso größer ist, je STÄRKER der Strom behindert wird. Deswegen ist das, was wir uns hier ausgerechnet haben, U geteilt durch I , also der Widerstand.“ (BTR2, 310)

In der Mittelschule geht der Vermittlungsweg also immer über das Ohmsche Gesetz und die Quotientengleichheit von $\frac{U}{I}$. Diesem Quotienten wird dann eine Bedeutung als elektrischer Widerstand zugewiesen („Also man definiert diesen Quotienten, U durch I , Spannung durch Stromstärke, als elektrischen Widerstand.“ LRR5, 82). Explizit hergeleitet wird die Formel jedoch nicht, die einzige codierte Sequenz für die Definitionsformel findet sich bei Herrn Meyer, der nach der Behandlung des Ohmschen Gesetzes den Widerstand als Größe einführt und die SchülerInnen die Formel $R = \frac{U}{I}$ „erraten“ lässt.

Herr Meyer: „Was machen wir denn jetzt mit diesem U durch I ? Volt durch Ampere? Zwei Volt durch ein Ampere? Sind zwei Volt durch Ampere! Das muss ja was BEDEUTEN! Und DAS formuliert man jetzt als neue physikalische Größe, nämlich als Widerstand. [...] Versucht mal, eine Gleichung zu bilden, für dieses Gesetz. Für die neue Größe. Formelzeichen haben wir und den Zusammenhang haben wir auch.“ (EPR4, 52)

Auch wenn in der Mittelschule die Formel aus der Quotientengleichheit des Ohmschen Gesetzes heraus motiviert wird, wird sie nicht explizit daraus hergeleitet oder der Quotient begründet mit der Bedeutung des Widerstandes verknüpft. Es zeigt sich aber ein deutlicher Unterschied zwischen dem Charakter der Formeln $I \sim U$ und $R = \rho \cdot \frac{l}{A}$, die aus empirischen Messdaten hergeleitet werden, und der Formel $R = \frac{U}{I}$, die meist einfach vorgegeben oder als Bedeutung des Proportionalitätsfaktors oder des konstanten Quotienten $\frac{U}{I}$ aus dem Ohmschen Gesetz eingeführt wird. Dies spiegelt

sich auch in der Kategorie *Erkenntnistheoretische Klassifizierung der Formel* wider, die in Abschnitt 12.3.4 beschrieben wird.

12.2.3. Messprinzip

Die Kategorie *Messprinzip* umfasst Unterrichtspassagen, in denen die Verwendung einer Formel gefordert wird, um eine in der Formel vorkommende Größe implizit zu messen. Hierbei werden zunächst andere Größen gemessen und anschließend die Formel genutzt, um die gesuchte Größe zu berechnen. Häufig werden diese Größen dabei nicht explizit in die Formel eingesetzt, sondern lediglich erwähnt, dass die Formel hier genutzt werden muss. Die Kategorie umschreibt somit eine Anwendung der Formel, ohne dass diese Anwendung explizit ausgeführt werden muss.

Bei den hospitierten Stunden kommt diese Kategorie nur für die **Definitionsformel** $R = \frac{U}{I}$ vor. Für diese Formel stellt sie jedoch in der Oberkategorie *Formel wird angewendet oder interpretiert* mit 55 von 825 Codierungen (8%) eine relevante Kategorie dar, die auch bei allen LehrerInnen identifiziert werden konnte. Während das Zitat (1) die Rechnung explizit beschreibt, zeigt Zitat (2), wie die Rechnung in einigen Fällen nur impliziert wird.

(1) Frau Müller: „Das ist der Widerstand. Wir haben doch gelernt, der Widerstand R , den können wir nicht messen. Ihr habt kein Messgerät aufgeschrieben. Wir haben auch gesagt, es gibt für euch keins. Ihr könnt den Widerstand nur berechnen. Und zwar indem ihr die Spannung durch die Stromstärke dividiert.“ (BTR5, 16)

(2) Herr Schmitt: „Über U und I misst du dir den Widerstand.“ (SSG8, 185)

Viele LehrerInnen nennen als weitere Messvariante die Verwendung eines Multimeters, dass den Widerstand „direkt“ messen könne (Zitat (3)). Häufig wird dann aber betont, dass die SchülerInnen dieses nicht benutzen können oder dürfen. Nur in zwei Fällen wird dies begründet. Ein Lehrer sagt, es sei einfacher, über die Spannungs- und Stromstärkemessung zu gehen (Zitat (4)), eine andere Lehrerin begründet es mit dem Preis der benötigten Batterien (Zitat (5)). Nur ein Lehrer beschreibt, dass Multimeter das gleiche machen, wie die SchülerInnen bei einzelnen Messungen, dass auch hier der Widerstand nicht direkt gemessen wird, wie das Zitat (6) zeigt:

(3) Herr Jasper: „Wir KÖNNTEN auch unser Polytest Vielfachmessgerät verwenden, wenn es eingebaute Batterien HÄTTE, leider haben wir dort

keine Batterien eingebaut. Deswegen müssen wir dort immer über den Weg der Stromstärke- und Spannungsmessung gehen.“ (ABG1, 37)

(4) Herr Meyer: „Es gibt das Messverfahren, dass wir einen Widerstandsmesser anschließen. (...) Ihr habt vielleicht gesehen an dem [unv.] und an dem Messgerät war auch mal was mit R und Ohm zu sehen, also so ein Messgerät können wir nehmen. Das geht einfacher, indem wir einen Messvorschrift entwickeln und die Stromstärke messen, wie hier da rechts in dem aufgebauten Versuch.“ (EPR4, 61)

(5) Frau Carle: „Es gibt ein Messgerät, den Widerstandsmesser. Den betrachten wir aber im Unterricht nicht. Da bräuchten wir jedes Mal Batterien. Und das ist einfach eine zu teure Angelegenheit.“ (LRR5, 113)

(6) Herr Lenz: „Wir können also den Widerstand NIE direkt messen, wir haben kein Messgerät, der / das uns sofort den Widerstand anzeigt, sondern auch diese kleinen Geräte, die wir das letzte Mal hatten, machen genau das selbe. Die messen die Spannung, messen die Stromstärke und verrechnen die.“ (HBG1, 27)

12.2.4. Beschreibung der Einheit

In wenigen Fällen beschreiben LehrerInnen den Widerstand, wie er über die Formel $R = \frac{U}{I}$ definiert ist, mit Hilfe der Einheiten, die in der Formel gleichgesetzt werden. Durch die Grundeinheiten Volt und Ampere wird so die Einheit Ohm beschrieben. Die Aussagen gehen dabei über eine reine Entsprechung der Einheiten (ein Ohm ist ein Volt durch ein Ampere) hinaus und beziehen eine Interpretation des mathematischen Ausdrucks mit ein.

Herr Schmitt: „Und jetzt haben wir beispielsweise, ja behalten wir unsere Zahl, 33 OHM, was ja das gleiche ist wie 33 VOLT durch AMPERE (...) heißt also jetzt wieder übersetzt, ich brauche 33 VOLT (...) PRO (...) EINEM Ampere. Also um den Strom von einem Ampere fließen zu lassen, ein Ampere waren diese sechstrillionen Elektronen pro Sekunde, brauche ich 33 Volt. Das heißt, diese Einheit gibt mir an, wie viel Volt, wie viel KRAFT brauche ich, um ein Ampere fließen zu lassen.“ (SSG3, 78)

Häufig sind die Aussagen weniger detailliert als das oben angegebene Zitat, das sehr ausführlich beschreibt, wie die Einheit und damit implizit auch die Formel, die diese Einheiten gleichsetzt, physikalisch-mathematisch verstanden werden kann. Oft

wird lediglich der Bruchstrich als ein „pro“ interpretiert („ein Ohm ist gleich ein Volt pro Ampere“ KTH3, 175). Eine solche Bedeutungszuweisung des Bruches ist in der Physik sehr verbreitet (s. Kap. 3.3.2).

Neben dieser Verknüpfung mit einer Bedeutung gibt es auch Aussagen, die nicht direkt zusätzliche Informationen über die Bedeutung der Formel oder der Einheit Ohm darstellen, sondern beschreiben, woher die Einheit kommt: Sie resultiert aus einer Berechnung („Die Einheit ein Ohm ergibt sich also aufgrund dieser Berechnung/ ein Volt pro Ampere ist definiert als ein Ohm.“ KTH4, 58) oder als Ehrung eines Physikers („diese Einheit, die du jetzt gerade nicht weißt, die war ja NUR ein Name zu Ehren eines Physikers für eine andere Einheit.“ BTR3, 27).

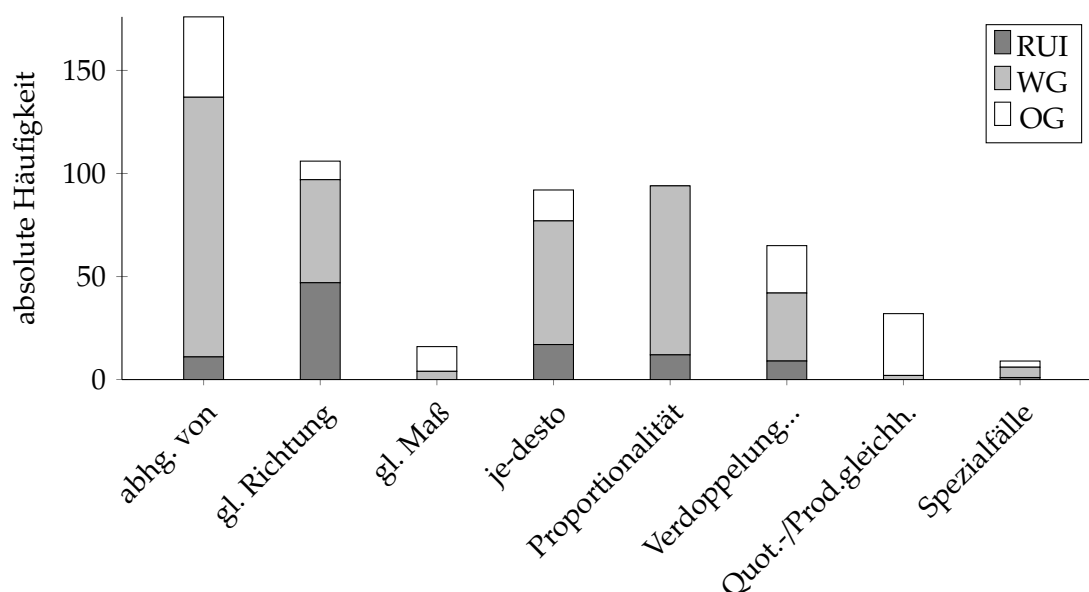
Diese Kategorie tritt nur bei drei LehrerInnen auf und stellt mit 16 Codierungen nur etwa 2% der Codierungen in der Oberkategorie *Formel wird angewendet oder interpretiert* für die Formel $R = \frac{U}{I}$. Da Einheiten innerhalb der Physik eine sehr wichtige Bedeutung tragen, stellt diese Kategorie aber im Sinne einer Bedeutungszuweisung zu mathematischen Strukturen (s. Kap. 3.3.2) eine wichtige Möglichkeit dar, mathematische Bedeutungen von Formeln mit physikalischem Inhalt zu verknüpfen.

12.2.5. Zusammenhang der Größen untereinander

Im beobachteten Unterricht wurde der Zusammenhang der in der Formel vorkommenden Größen auf sehr unterschiedliche Arten verbalisiert. Diese weisen ein verschiedenes Maß an Quantität auf: von einer qualitativen Abhängigkeit über die Richtung, in die sich eine abhängige Größe bei Veränderung einer anderen Größe verändert, und halbquantitative je-desto-Aussagen bis hin zur Beschreibung von Verhältnissen und der quantitativen Betrachtung konkreter Zahlenwerte bei der Untersuchung von Spezial- oder Grenzfällen.

Viele der gefundenen Kategorien sind dabei eng verknüpft mit der Proportionalität. So gilt für direkt proportionale Größen, dass sie sich im gleichen Maße verändern, dass man ihr Verhalten mit je-größer-desto-größer-Aussagen beschreiben kann, sich bei Verdoppelung, Verdreifachung und so weiter der einen Größe auch die zweite Größe verdoppelt, verdreifacht und so weiter und der Quotient der beiden proportionalen Größen konstant ist. Für indirekt proportionale Größen gilt entsprechend die Veränderung in umgekehrtem Maß, die Formulierung von je-desto-Aussagen mit „je größer, desto kleiner“, die Halbierung einer Größe bei Verdoppelung der anderen und die Konstanz des Produktes der beiden indirekt proportionalen Größen.

Auffällig bei der Betrachtung der zahlenmäßigen Verteilung der Unterkategorien auf die einzelnen Formeln ist, dass bei dieser Kategorie die codierten Textstellen für

Abbildung 12.15.: Codehäufigkeiten zu *Zusammenhang zwischen Größen*

das Widerstandsgesetz gegenüber den anderen beiden Formeln deutlich überwiegen. Bei allen anderen Kategorien und auch der Betrachtung der insgesamt codierten Textstellen überwiegt die Definitionsformel $R = \frac{U}{T}$. Für das Widerstandsgesetz macht die Kategorie *Zusammenhang zwischen Größen* 362 von 649 codierten Textstellen in der Oberkategorie *Kategorie wird angewendet oder interpretiert* aus (56%) und 43% aller codierten Textstellen für das Widerstandsgesetz. Damit hat diese Kategorie für das Widerstandsgesetz eine besondere Relevanz.

Vergleich der LehrerInnen: Die Verteilung der Codierungen auf die einzelnen LehrerInnen (Diagramm D.16 im Anhang) zeigt, dass die meisten Unterkategorien bei allen LehrerInnen vorkommen. Eine Ausnahme stellen die Unterkategorien *Quotienten- bzw. Produktgleichheit* und die *Spezial- und Grenzfälle* dar, die jeweils bei 4 LehrerInnen nicht vorkommen. Bei den meisten LehrerInnen kommen alle Kategorien auch in ähnlicher Größenordnung vor. Nur Herr Jasper arbeitet vor allem mit Proportionalitäten, während die anderen Unterkategorien kaum bis gar nicht vorkommen. Außerdem fällt auf, dass die Kategorie *Zusammenhang zwischen den Größen* insgesamt bei Frau Müller (102 Codierungen) und Frau Berger (101 Codierungen) besonders häufig vorkommt. Bei Frau Berger macht diese Kategorie somit etwa 39% der gesamten Codierungen aus (101 von 262 Codierungen), bei Frau Müller 20% (102 von 511 Codierungen) (s. Diagramme D.6 im Anhang).

abhängig von

Die einfachste Art des Zusammenhanges ist die Feststellung einer Abhängigkeit: eine Größe ist abhängig von einer anderen. Die Art der Abhängigkeit wird nicht näher beschrieben. Es lassen sich also keinerlei Ableitungen aus dieser Aussagen machen, wie sich eine Größe in Abhängigkeit einer anderen verändert. Häufig wird beispielsweise vor experimentellen Untersuchungen bereits gesagt, dass eine Größe von einer anderen abhängt und die Art der Abhängigkeit untersucht werden soll (z. B.: „Und zwar wir wollen den elektrischen Widerstand untersuchen und zwar in ABHÄNGIGKEITEN der drei genannten Eigenschaften. Länge, Querschnitt und Material.“ SBG4, 19) oder wenn konkrete Anwendungen oder Probleme beschrieben werden, bei denen die in der Formel vorkommenden Größen relevant sind (z. B. „Wenn wir die Stromstärke in einem Stromkreis verändern wollen, können wir das, indem wir den Widerstand verändern.“ BTR7, 172).

Veränderung in gleiche / unterschiedliche Richtung

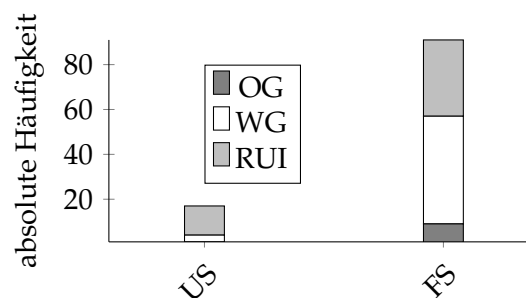


Abbildung 12.16.: Codehäufigkeiten Unterkategorien zu *Veränderung in gleiche / unterschiedliche Richtung*; US...Unterrichtssprache, FS...Fachsprache

Eine erste Spezifizierung der Art der Abhängigkeit folgt, wenn gesagt wird, dass sich zwei Größen in die gleiche Richtung verändern („geringer Widerstand, demzufolge also auch geringer Spannungsabfall“ ABG6, 73) oder in genau umgekehrte Richtung verändern („Wenn wir die Dicke vergrößern, wird der Widerstand kleiner.“ BTR6, 140).

Für die Unterkategorie existieren zwei unterschiedliche Ausprägungen. Zum einen gibt es Aussagen, die diese Veränderungen auf unterrichtssprachlichen Niveau beschreiben, zum anderen solche auf fachsprachlichem Niveau.

Bei Äußerungen in **Unterrichtssprache** werden mindestens für eine der Größen, die zueinander in Beziehung gesetzt werden, statt der Fachtermini Umschreibungen ge-

nutzt, wie im folgenden Beispiel für die Stromstärke. Die Unterscheidung der Sprach-ebenen bezieht sich in diesem Fall vorrangig auf die Lexik (s. auch die Betrachtungen über Fach- und Alltagssprache in Kap. 4.3).

Frau Müller: „HIER ist der Widerstand kleiner. Hier können die Elektronen viel besser durch. Das heißt, an einer Stelle kommt/ kommen einfach viel mehr vorbei.“ (BTR2, 261)

Zum anderen gibt es Aussagen auf **fachsprachlichen** Niveau, bei denen die korrekten Fachtermini genutzt werden. Diese Aussagen können allein das Verhalten der Größen beschreiben (Zitat (1)), kausale wenn-dann-Beziehungen ausdrücken (Zitat (2)), sich auf Erklärung von Beobachtungen beziehen (Zitat (3)) oder die Zusammenfassung experimenteller Ergebnisse sein (Zitat (4)). In einzelnen Fällen wird die Veränderung durch Formelzeichen und Symbole ausgedrückt (s. Tafelbild in Abb. 12.17). Diese unterschiedlichen Ausprägungen deuten bereits an, dass die Zusammenhänge und die Art ihrer Aussagen auf unterschiedliche Art und Weise interpretiert werden können. Dies kann in Zusammenhang mit der erkenntnistheoretischen Klassifizierung einer Formel gesehen werden, die in Kapitel 12.3.4 näher erläutert wird.

(1) Frau Berger: „Die Stromstärke wächst, der Widerstand wird kleiner“ (AWR6, 127)

(2) Herr Jasper: „Wenn der Widerstand GRÖSZER wird, (...) heißt das, der Spannungsabfall wird größer.“ (ABG6, 73)

(3) Herr Schmitt: „MEHR Spannung für ähnlichen Strom heißt (...) höherer Widerstand.“ (SSG4, 214)

(4) Herr Jasper: „Man stellt fest, in dem Moment, wenn die Querschnittsfläche ERHÖHT wird, (7 s) dass sich der Widerstand verkleinert.“ (ABG5, 77)

Dicke $\uparrow$ $\rightarrow$ $R \downarrow$
Länge $\uparrow$ $\rightarrow$ $R \uparrow$

Abbildung 12.17.: Ausschnitt der Abschrift eines Tafelbilds zur Diskussion des Verhaltens der Größen des Widerstandsgesetzes (BTR6, TB)

In den hospitierten Stunden werden sehr viel häufiger Äußerungen in Fachsprache als in Alltagssprache gemacht (vgl. Diagramm 12.16). Dies könnte dann lerntheoretisch von Vorteil sein, wenn davon ausgegangen wird, dass die Begriffsbildung zu

den Termini durch die Äußerungen, die in Kategorie *Beschreibung der einzelnen Größen* gemacht werden, geleistet wird, und die Fachtermini nun diese Konzepte repräsentieren. In dem Moment, wenn mathematische Verhältnisse beschrieben werden, kann das Verwenden der Fachtermini als Repräsentanten für die umfassende Bedeutung einer physikalischen Größe ökonomisch sein und somit auch kognitiv entlasten (s. Merkmal der Ökonomie von Fachsprachen in Kap. 4.3.1). Andererseits kann natürlich das vielfältige Formulieren auch in Unterrichts- und Alltagssprache dazu beitragen, dass SchülerInnen neben der mathematischen Bedeutung der Veränderungen auch eine physikalische Bedeutung verknüpfen und so die strukturelle Rolle der Mathematik betont wird, da von einer floskelhaften Ableitung der Veränderungen von Größen aus der Formel abgewichen wird.

Die unterschiedlichen Häufigkeiten der Formeln können unter anderem auf die Anzahl der in der Formel vorkommenden Größen zurückgeführt werden. Wenn ich viele Größen in einer Formel habe, kann ich auch viele unterschiedliche Größen zueinander in Beziehung setzen. Bei 3 Größen oder mehr müsste mathematisch präzise bei jeder Aussage betont werden, dass die jeweils dritte Größe konstant bleibt, damit die Aussage wahr ist. Dies ist für die Kategorien *Veränderung in gleichem / umgekehrten Maß*, *Proportionalität* und *je-desto* ebenfalls von Bedeutung. Nur in sehr wenigen Fällen wird dies von den LehrerInnen wirklich formuliert (z. B. auf einem Arbeitsblatt: „Soll die Stromstärke größer werden, dann muss der Widerstand verkleinert werden bei konstanter Spannung.“ AWR6, AB 2)

Beim Widerstandsgesetz kann betrachtet werden, wie sich der Widerstand verändert, wenn 1. der spezifische Widerstand 2. die Länge des Leiters und 3. die Querschnittsfläche des Leiters verkleinert oder vergrößert wird. Eine weitere denkbare Option wäre ein vertieftes mathematisches Spielen mit den Größen, indem man zum Beispiel fragt, ob sich die Länge eines Drahtes vergrößern oder verkleinern müsste, wenn sich der Querschnitt verkleinert, man aber einen konstanten Widerstand erhalten möchte (s. auch Beschreibung des Exploration-Pattern von Lehavi *et al.* (2019) in Kap. 3.3.3). Dies ist bei den beobachteten LehrerInnen nicht vorgekommen.

Bei der Richtung der Formulierungen ist auf physikalische Sinnhaftigkeit zu achten. Nicht alles, was mathematisch möglich ist, ist physikalisch auch sinnvoll. Es muss berücksichtigt werden, welche Größe sich in Abhängigkeit einer anderen verändert. Eine Beispielaussage, die eine Kausalität ungünstig ausdrückt, ist die folgende: „Dass je größer der Querschnitt ist, (...) der Stromfluss größer wird, wird der Widerstand kleiner.“ (ABG5, 58). Diese Aussage könnte so gedeutet werden, dass der Stromfluss die Größe ist, die tatsächlich messbar ist. Vergrößere ich also den Querschnitt eines Leiters, dann kann ich eine größere Stromstärke messen, was durch die Definition

$R = \frac{U}{I}$ zu einem kleineren Widerstand führt. Es könnte aber auch so verstanden werden, dass die Stromstärke den Widerstand beeinflusst, was physikalisch nicht sinnvoll ist. Man sollte also berücksichtigen, dass mathematisch identische Aussage verschieden physikalisch erklärt werden können: $I \uparrow \rightarrow R \downarrow$ kann entweder bedeuten: höhere Stromstärke „führt zu“ größerem Widerstand (was physikalisch keinen Sinn macht) oder höhere Stromstärke „ist ein Indiz für“ einen kleineren Widerstand in der Schaltung (was physikalisch Sinn macht).

Veränderung in gleichem / umgekehrtem Maß

Die Spezifizierung, dass sich zwei Größen nicht nur in gleicher Richtung, sondern in gleichem Maß, beziehungsweise nicht nur in unterschiedliche Richtungen, sondern auch in umgekehrtem Maß verändern, wird nur sehr selten gemacht. Diese Aussagen sind Bedingung für Proportionalitäten und eng verknüpft mit je-desto-Aussagen, die ebenfalls implizieren, dass sich zwei Größen in gleichem oder umgekehrtem Maß verändern. Diese Kategorie kommt vor allem beim Ohmschen Gesetz vor, auf das hier 12 von insgesamt 15 Codierungen fallen.

Die Kategorie *Veränderung in gleichem / umgekehrtem Maß* kommt nur bei 6 der 10 hospitierten LehrerInnen vor (s. Diagramm D.16 im Anhang). 10 der insgesamt 15 Codierungen fallen auf zwei LehrerInnen: Fau Carle und Frau Gerber.

Beispiel (1) zeigt eine Verknüpfung der mathematischen Veränderung der Größen mit physikalischer Bedeutung (kausale wenn-dann-Beziehung der Größen). Häufig werden die Aussagen jedoch von den konkreten Größen losgelöst und auf Proportionalitäten allgemein bezogen. Die Aussagen werden damit rein mathematisch, wie das Beispiel (2) zeigt:

(1) Frau Gerber: „Das heißt also, ob sich, wenn die Spannung erhöht, die Stromstärke GENAUSO erhöht. Das heißt die Veränderungen gleich sind.“ (KTH2, 113)

(2) Frau Berger: „Proportional HEISZT: Was mit der einen Größe passiert, passiert auch mit der anderen Größe, wenn wir es ganz kurz formulieren wollen.“ (BTR4, 80)

je-desto

Die Formulierung von je-desto-Aussagen ist prinzipiell eine Spezialform von der *Veränderung in gleichem / umgekehrtem Maß*. Da diese Formulierungen im Unterricht eine wichtige Rolle spielen, werden sie in einer eigenen Kategorie zusammengefasst. Die

Formulierung von je-desto-Sätzen auf Grundlage von Messwerten und damit als Zwischenschritt der mathematischen Auswertung eines Experimentes oder abgeleitet aus einer Formel ist bei den meisten LehrerInnen eine Standardaufgabe, die im hospitierten Unterricht nicht weiter erklärt wird: „Hier können wir je-desto anwenden. Los gehts.“ (AWR2, 121)

Für das **Ohmsche Gesetz** wird die Aussage meist formuliert als „Je größer die Spannung, desto größer die Stromstärke.“ (Schüleraussage AWR2, 144). Eine Lehrerin formuliert in zwei Fällen andersherum: „Je größer die Stromstärke, desto größer die Spannung.“ (LRR5, 38) Und nur in einem Fall wird auch die Veränderung in die andere Richtung formuliert: „Je kleiner die Spannung, desto kleiner ist die Stromstärke?“ (Schüleraussage AWR2, 126) Diese Formulierungen werden immer aus experimentellen Messwerten abgeleitet. Nur in einem Fall wird die Aussage implizit aus der Formel abgeleitet: „ I proportional U Also: Je größer die Stromstärke, desto größer die Spannung. DAS ist das OHMsche Gesetz.“ (LRR5, 38)

Für die **Definitionsformel** des Widerstandes $R = \frac{U}{I}$ formulieren nur 3 LehrerInnen je-desto-Aussagen. Zwei Lehrende (Herr Lenz und Frau Berger) üben explizit das Ableiten von je-desto-Aussagen aus der Formel. Dabei betonen sie auch die Bedingung, unter der die Aussage gültig ist: die Konstanz der dritten in der Formel vorkommenden Größe. Das folgende Zitat zeigt auch, dass die Reihenfolge der Formulierung angepasst wird, sobald eine physikalische Bedeutung formuliert wird⁹:

„wir formulieren eine Aussage, je-desto und welche Bedingung dafür notwendig ist. [...] Je KLEINER die Stromstärke bei konstanter Spannung, (...) desto GRÖßER ist der Widerstand. (12 s) Wir haben einen Antrieb, der die Elektronen von Minus- zum Pluspol leiten will, aber je größer der Widerstand ist, der sich dieser Bewegung der Elektronen entgegen setzt, desto weniger kommen durch, desto kleiner ist die Stromstärke.“ (HBG2, 21-36)

Für das **Widerstandsgesetz** leiten alle LehrerInnen aus experimentellen Messwerten für Widerstand und Länge (Zitat 1) beziehungsweise Querschnittsfläche (2) je-desto-Aussagen ab, die dann häufig wiederum in Proportionalitäten überführt werden, wie auch das Tafelbild im Anhang zeigt (Abb. D.25). Im Tafelbild zeigt sich auch, dass hier die Gültigkeitsbedingungen für diese Aussage notiert werden. Mündlich werden diese für das Widerstandsgesetz an keiner Stelle formuliert. Die Verwendung von größer und kleiner scheint zufällig zu geschehen. Meist beginnt die Aussage mit „je größer...“ und die zweite Größe wird dann angepasst, je nachdem ob direkte oder

⁹Dieser Aspekt wird in Kapitel 15.3 im Sinne einer strukturellen oder technischen Verwendung von Mathematik näher erläutert.

indirekte Proportionalität vorliegt. Nur in einem Fall wird explizit betont, dass beide Formulierungen möglich sind (3).

- (1) „Wir haben festgestellt, je länger der (...) Leiter ist, (...) Komma desto größer (5 s) ist der Widerstand.“ (BTR5, 42)
- (2) „Je größer die QUERSCHNITTSFLÄCHE, desto kleiner der Widerstand.“ (AWR5, 92)
- (3) „je GRÖßER die Fläche, desto kleiner der Widerstand. Oder je kleiner die Fläche, desto größer der Widerstand.“ (HBG3, 129)

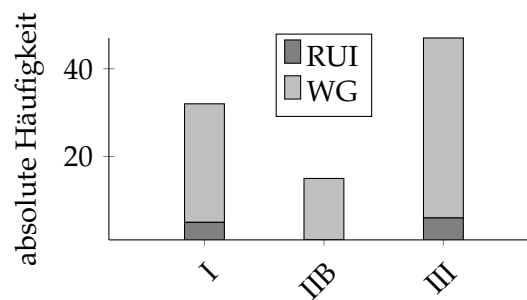
Es zeigt sich ein Umgang mit je-desto-Aussagen, der von der Art der Formel und ihrer Einführung abhängig zu sein scheint. Für das Ohmsche Gesetz und das Widerstandsgesetz werden die je-desto-Aussagen (bis auf eine Ausnahme) ausschließlich aus Messwerten abgeleitet und sind die Grundlage für das Feststellen einer direkten oder indirekten Proportionalität. Die Definitionsformel, die fast immer vorgegeben und nicht experimentell induktiv erarbeitet wird, bildet bei zwei LehrerInnen die Grundlage für das Formulieren von je-desto-Sätzen. In diesem Fall wird auch die Gültigkeitsbedingung für die Aussagen (Konstanz der weiteren Größen) meist explizit thematisiert.

Proportionalität

Eng verknüpft mit den je-desto-Aussagen ist die Proportionalität zweier Größen. Die Aussage, dass zwei Größen zueinander proportional sind, kommt in drei unterschiedlichen Ausprägungen vor, die mit Hilfe des Ebenenmodells der Versprachlichung von Formeln (s. Kap. 5) beschrieben werden können. Proportionalitäten können in ihrer äußeren Form durch einen algebraischen Ausdruck der Form $R \sim l$ notiert werden (Ebene I), oder indem dies als Satz mit Formelzeichen verbalisiert wird: R ist proportional zu l (Ebene IIB) oder als dritte Möglichkeit als Satz mit physikalischen Termini: Der Widerstand ist proportional zur Länge des Leiters (Ebene III). Die Kategorie *Proportionalität* wurde vorrangig für das Widerstandsgesetz genutzt (s. Diagramm 12.18).

Für die Definitionsformel des Widerstandes wurden 12 Aussagen als *Proportionalität* codiert. Diese stammen alle von einer Lehrerin (Frau Berger). Bei anderen LehrerInnen kommen durchaus auch Aussagen zu Proportionalitäten zwischen I und U vor. Diese beziehen sich jedoch auf das Ohmsche Gesetz und stellen somit die Ebenen I, IIB und III des Ohmschen Gesetzes dar und werden nicht aktiv mit der Formel $R = \frac{U}{I}$ verknüpft.

Die Kategorie *Proportionalität* kommt nur bei einer Lehrerin (Frau Gerber) nicht vor (s. Diagramme D.16 im Anhang). Diese nutzt in der von ihr unterrichteten Haupt-

Abbildung 12.18.: Codehäufigkeiten Unterkategorien zu *Proportionalität*

schulklasse nur die Formulierung von je-desto-Aussagen für den Zusammenhang der Größen.

Die **Ebene I** wird in vielen Fällen genutzt, um die Ergebnisse der Experimente zur Abhängigkeit des Widerstandes von Länge und Querschnittsfläche eines Drahtes zusammenzufassen (s. Tafelbild in Abb. D.25). Einige LehrerInnen tragen wie im genannten Tafelbild die experimentell erhaltenen Messwerte in ein Diagramm ein und identifizieren die Proportionalität mit Hilfe des Diagrammes. In anderen Fällen wird meist aus nur wenigen Messwerten und dem „Erkennen“ eines je-desto-Zusammenhanges, also einer Veränderung in gleichem beziehungsweise umgekehrtem Maß, auf Proportionalitäten geschlossen. Aus diesen Proportionalitäten wird dann häufig das Widerstandsgesetz hergeleitet, wie in Kapitel 12.2.2 beschrieben wird und im Tafelbild in Abbildung 12.14 zu sehen ist.

Die **Ebene IIB** stellt dann meist das mündliche Pendant zu den Notationen an der Tafel dar, wobei mindestens ein Formelzeichen nicht durch den entsprechenden Terminus ersetzt wird: „ R proportional zu l , l ist unser Zeichen für die Länge.“ (HBG3, 93), „ R ist proportional zu Eins durch A . Also indirekt proportional zur Fläche.“ (SSG8, 38) Für die umgekehrte Proportionalität treten dabei sowohl Aussagen wie „proportional Eins durch“ die entsprechende Größe, als auch der Ausdruck „indirekt proportional“ zur entsprechenden Größe auf. In einigen Fällen werden beide Aussagen wie im obigen Zitat kombiniert.

Die **Ebene III** enthält die gleichen Aussagen wie die Ebenen I und IIB, jedoch ohne Formelzeichen: „Der Widerstand ist proportional zur Länge.“ (HBG3, 93), „der Widerstand ist proportional zu EINS durch Querschnitt“ (SBG4, 127), „Der Widerstand eines Drahtes ist umgekehrt proportional zur Querschnittsfläche des Drahtes“ (EPR6, TB). Hier ist auffällig, dass 16 von 41 Codierungen für das Widerstandsgesetz auf Herrn Funke fallen (39%). Dieser formuliert auch siebenmal die Proportionalitäten schriftlich

an der Tafel beziehungsweise auf einem Arbeitsblatt. Die Ebene IIB kommt bei ihm gar nicht vor. Er formuliert also alle Aussagen mit den Termini anstelle der Formelzeichen.

Verdoppelung...

Viele LehrerInnen untersuchen den Zusammenhang zweier Größen, indem sie mit konkreten Zahlen verdeutlichen, dass sich bei direkter Proportionalität beide Größen verdoppeln, verdreifachen und so weiter beziehungsweise bei indirekter Proportionalität sich bei Verdoppelung, Verdreifachung der einen Größe die andere halbiert, drittelt. Dieses Verhalten kann entweder sehr allgemein formuliert sein (Zitat (1)) oder mit konkreten Werten arbeiten (2).

(1) Herr Jasper: „Doppelte Spannung wird in dem Zusammenhang, der Widerstand bleibt ja GLEICH. Dann bedeutet doppelte Spannung, Anton?“

Anton: „(doppelte Stromstärke?)“

Herr Jasper: „Richtig, also wenn wir jetzt eine zwölf-Volt-Batterie verwenden, richtig, würde jetzt eine Stromstärke von 240 Ampere fließen.“ (ABG6, 85-87)

(2) „dreifache Spannung $\rightarrow$ *dreifache* Stromstärke

dreifacher Widerstand $\rightarrow \frac{1}{3}$ Stromstärke

Halber Widerstand $\rightarrow$ *doppelte* Stromstärke“ (AWR4, AB, kursive Begriffe und $\frac{1}{3}$ von SchülerInnen eingesetzt)

Zahlenmäßig überwiegen die allgemeinen Aussagen deutlich gegenüber den konkreten Zahlenwerten. Für die Definitionsformel des Widerstandes wird nur einmal, für das Ohmsche Gesetz werden zweimal konkrete Zahlenbeispiele für die Verdoppelung der Größen genannt, für das Widerstandsgesetz werden nur allgemeine Aussagen gemacht.

Allgemein scheint die Verdoppelung für alle LehrerInnen ein relevanter Punkt für das Verhalten proportionaler Größen zu sein, da sie von allen LehrerInnen angesprochen wird. Frau Berger (14 Codierungen), Herr Lenz (18), Herr Meyer (10) und Frau Müller (17) sprechen diesen Aspekt der Proportionalität besonders häufig an und machen mit insgesamt 59 von 65 Codierungen 91% der codierten Textstellen in dieser Unterkategorie aus (s. Diagramm D.16 im Anhang).

Quotienten- / Produktgleichheit

Ähnlich wie auch die Verdoppelung beider Größen bei direkter und die Verdoppelung der einen bei Halbierung der anderen Größe bei indirekter Proportionalität ist auch die Konstanz des Quotienten zueinander proportionaler Größen und des Produktes zueinander indirekt proportionaler Größen eine Bedingung für das Vorliegen einer (in-)direkten Proportionalität. Auch bei diesem Verhalten zweier Größen gibt es die Variante, dass die Gleichheit allgemein als Regel ausgedrückt wird (Zitat (1)) oder Quotienten oder Produkte konkret berechnet werden (2). Die Kategorie kommt fast ausschließlich für das Ohmsche Gesetz vor, wo sie in den meisten Fällen als eine Art Testinstrument für die Gültigkeit des Ohmschen Gesetzes angewendet wird. Nur ein Lehrer (Herr Jasper) nutzt die Quotienten- und Produktgleichheit beim Widerstandsgesetz für die Herleitung der Formel, wie (3) verdeutlicht.

(1) Herr Meyer: „Proportional heißt, der Quotient bleibt konstant.“ (EPR4, 28)

(2) Herr Weber: „Also wenn ich die teile, die Spannung durch die Stromstärke, dann krieg ich hier Vier raus. Und hier Vier raus. Wir sehen, das ist ja eigentlich total gleich. Also Ohmsches Gesetz.“ (KPR4, 81)

(3) Herr Jasper: „Wenn ich WEISZ, dass R geteilt durch I konstant ist und wenn ich auch weiterhin weiß, dass R multipliziert mit A konstant ist und ich die beiden Größen jetzt zusammenführen würde. (7s) Ich bilde den Quotienten [sic] aus R mal A (...) und dividiere das Ganze durch I .“ (ABG5, 90)¹⁰

Vergleich der LehrerInnen: Diese Kategorie wird von 6 der 10 beobachteten LehrerInnen im Unterricht genutzt. Bei 4 LehrerInnen wird somit die Quotientengleichheit nicht thematisiert, obwohl sie insbesondere bei den hier betrachteten Formeln eine sehr relevante Rolle spielt, da der Quotient aus Spannung und Stromstärke, deren Proportionalität das Ohmsche Gesetz ausdrückt, ja bekannter Weise den Widerstand definiert. Hier fällt auf, dass 3 der 4 Gymnasiallehrer die Quotientengleichheit nicht betrachten. Die vierte Lehrerin, bei der diese Kategorie nicht vorkommt, ist die Lehrerin der Hauptschulklasse, Frau Gerber. Bei anderen LehrerInnen wurde diese Kategorie besonders häufig identifiziert: Frau Berger (7 Codierungen), Frau Müller (10) und Herr Weber (8). Mit 25 von 32 Codierungen machen sie etwa 78% der gesamten Codierungen dieser Kategorie aus. Es gibt somit zum einen LehrerInnen, die diese Kategorie oft nutzen, zum anderen gibt es LehrerInnen, bei denen sie gar keine Rolle spielt.

¹⁰ ausführliches Zitat im Anhang unter D.6.2

Spezial- / Grenzfälle

Die Kategorie *Spezial- und Grenzfälle* spielt mit nur 9 Codierungen (1 für die Definitionsformel, 5 für das Widerstandsgesetz und 3 für das Ohmsche Gesetz) im hospitierten Unterricht eine untergeordnete Rolle. Sie kommt zwar sehr selten vor, wird aber von 6 von 10 der hospitierten LehrerInnen genutzt (s. Daigramm D.16 im Anhang).

Der einzige Extremfall, der für das **Ohmsche Gesetz** im hospitierten Unterricht identifiziert wurde, ist der Fall Spannung $U = 0\text{ V}$: „Null-Null soll das erste Kreuz sein, weil du keine Spannung misst. Wenn keine Spannung anliegt, fließt auch kein Strom.“ (AWR3, 87).

Für das **Widerstandsgesetz** betrachten die LehrerInnen die Spezialfälle für einen sehr großen beziehungsweise kleinen spezifischen Widerstand. Die Überlegungen zu dieser charakterisierenden Zahl werden jedoch nicht explizit mit dem Widerstandsgesetz verknüpft. Es bleibt bei der Betrachtung, dass ein Stoff mit einem großen spezifischen Widerstand ein Isolator oder schlechter Leiter ist und ein Stoff mit einem kleinen Zahlenwert für den spezifischen Widerstand sich gut als elektrischer Leiter eignet, wie das Zitat (1) zeigt. Lediglich ein Lehrer verknüpft diese Überlegungen, wenn auch nicht mit dem Widerstandsgesetz, so doch mit der Definitionsformel des Widerstandes (Zitat (2)). Zitat (3) zeigt das einzige Beispiel für die **Definitionsformel** des Widerstandes. Bei diesem handelt es sich eher um einen Spezial- als um einen Grenzfall. Auch wenn der Lehrer sagt, dass er einen großen und einen kleinen Widerstand betrachtet, könnte man den Effekt sehr viel deutlicher zeigen, indem man einen Widerstand, der nahezu $0\ \Omega$ beträgt (also $R \rightarrow 0$), mit einem Widerstand vergleicht, der sehr groß ist (z. B. $R = 100\ \text{M}\Omega$), und schließlich den Fall $R \rightarrow \infty$ betrachten.

(1) Herr Meyer: „Wir müssen also das Material berücksichtigen und den Wert NULL KOMMA NULL EINS SIEBEN finden wir im Tafelwerk oder im Lehrbuch. Wir hatten ja nachgeguckt, welche Stoffe besonders gut Strom leiten. Da haben wir herausgefunden, dass es eine kleine Zahl sein muss. Bei anderen Metallen, die ja GUT Strom leiten, stellen wir fest, dass die Null schon weg ist. Also eine ganze Zehnerpotenz größer ist.“ (EPR10, 128)

(2) Herr Schmitt: „Wie UNTERSCHIEDET man Leiter und Isolatoren? Leiter haben eine sehr, sehr kleine Dichte / sehr, sehr kleinen spezifische Leitf/ (...) Wird Zeit, dass frei wird. Einen sehr, sehr kleinen spezifischen elektrischen Widerstand. Während Isolatoren einen sehr hohen elektrischen spezifischen Widerstand haben. Was heißt jetzt zehn hoch 13? [...] eine Eins mit 13 nullen. Also ist schon eine sehr, sehr hohe Zahl. Das ist ein Wid/ das

ist ein Isolator. (...) Wenn wir uns überlegen, was der Widerstand am Ende IST, der Widerstand gibt an, wie viel Spannung ich brauche für ein Ampere Stromfluss. Heißt einfach hier, es wird fast über kein Strom durchgeleitet. Beispielsweise Glas, trockenes Holz, Papier, (...) Polypropylen oder halt auf Deutsch gesagt Plastik, (...) Porzellan, destilliertes Wasser (...) und so weiter und so fort. (...) Bis / bis / genau in diesem Intervall.“ (SSG8, 59-63)

(3) Herr Schmitt: „Und wenn eben der Widerstand HOCH ist, beispielsweise vierzig Ohm, brauche ich eben vierzig Volt und wenn der Widerstand KLEIN ist, beispielsweise 29 Ohm, dann brauche ich da 29 Volt.“ (SSG5, 61)

Diese Kategorie stimmt mit dem von Lehavi *et al.* (2019) identifizierten Exploration-Pattern überein (s. Kap. 3.3.3).

12.2.6. Anwendung oder Experiment

Während bei den bisher dargestellten Kategorien der mathematische Zusammenhang der Größen meist im Vordergrund steht, wird die Formel oder der Zusammenhang, der in der Formel dargestellt wird, in den Codings der Kategorie *Anwendung oder Experiment* genutzt, um einen physikalischen Vorgang zu beschreiben. Dieser physikalische Vorgang kann ein Experiment sein, das im Unterricht durchgeführt oder theoretisch beschrieben wird, es kann aber auch ein Phänomen oder eine Anwendung sein, für die der Zusammenhang relevant ist. Diese Anwendungen haben häufig einen Alltagsbezug und können so nach Muckenfuß (1995) und Müller (2006) Motivation und Interesse der SchülerInnen fördern (s. auch Kap. 3.3.4).

Die Kategorie teilt sich in die zwei Unterkategorien *genannt* und *erklärt*, deren wesentlicher Unterschied der Umfang und die inhaltliche Tiefe ist, in der eine Anwendung oder ein Experiment beschrieben oder erklärt wird. Bei allen drei Formeln nimmt das Nennen von Anwendungen einen wesentlich höheren Anteil ein als das Erklären, für das Ohmsche Gesetz konnten nur genannte Anwendungen identifiziert werden (vgl. Diagramm 12.19). Dies deutet darauf hin, dass Potenziale, Formeln mit Inhalten und Anwendungen zu verknüpfen, hier häufig nicht ausgeschöpft werden, da ein Bezug zur Formel zwar vorhanden ist, aber nicht explizit gemacht wird. Für die Definitionsformel des Widerstandes $R = \frac{U}{I}$ und das Widerstandsgesetz $R = \rho \cdot \frac{l}{A}$ werden etwa gleich viele relevante Passagen gefunden. Dies deutet darauf hin, dass die Kategorie für unterschiedliche Arten von Formeln eine ähnliche Relevanz hat und vermutlich gut auf andere Formeln übertragbar ist.

Beide Unterkategorien kommen bei allen LehrerInnen vor. Nur bei einem Lehrer

kommt die Unterkategorie *erklärt* häufiger vor als *genannt*. Bei allen anderen spiegelt die Gesamtverteilung auch die Verteilung bei den einzelnen LehrerInnen grob wider (vgl. dazu Diagramm D.11 im Anhang).

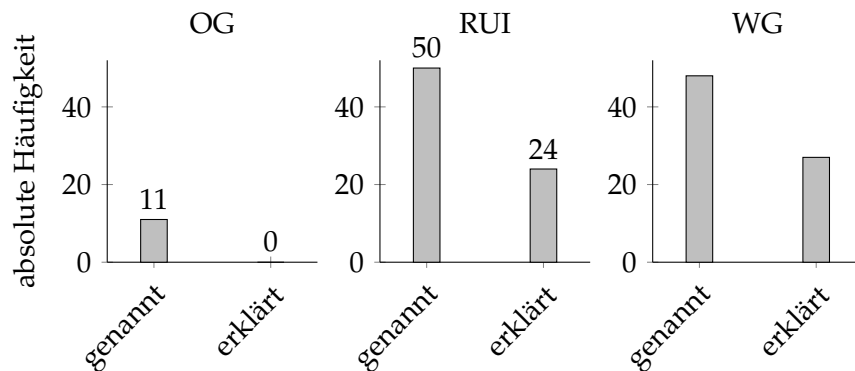


Abbildung 12.19.: Codehäufigkeiten Unterkategorien zu *Anwendung oder Experiment*

Anwendung oder Experiment: genannt

Für die einzelnen Formeln zeigen sich in der Kategorie *Anwendung oder Experiment: genannt* verschiedene Ausprägungen. Diese Ausprägungen sollen im Folgenden näher beschrieben werden:

$R = \frac{U}{I}$: technische Anwendung, Experiment, Vorwiderstand als Schutz für empfindliche Bauteile oder vor Kurzschluss, Widerstand als Eigenschaft eines Bauteils, Isolator oder Schalter

$R = \rho \cdot \frac{l}{A}$: technische Anwendung, Experiment, Problem, gute Leiter, Länge und Querschnitt von Kabeln im Kontext konkreter Anwendungen

$I \sim U$: technische Anwendung, Experiment

Für die **Definitionsformel** $R = \frac{U}{I}$ wird sehr häufig die Anwendung eines Vorwiderstandes als Schutz vor einem Kurzschluss genannt. Der Kurzschluss kann als Extremfall für $R \rightarrow 0$, was zu $I \rightarrow \infty$ führt, gesehen werden. Eine sehr hohe Stromstärke bedingt eine große Wärmeentwicklung im Kabel, was zum Durchbrennen des Kabels führt. In einem anderen Fall sind Bauteile verbaut, die nur für geringe Stromstärken ausgelegt sind und bei größeren Stromstärken beschädigt werden. Dies trifft zum Beispiel auf Halbleiterbauelemente wie LEDs zu. Ein Vorwiderstand verringert,

in Reihe zu diesem Bauteil geschaltet, die Stromstärke im gesamten Stromkreis. Die resultierende verringerte Stromstärke im Stromkreis kann mit Hilfe der umgestellten Formel $I = \frac{U}{R}$ berechnet werden. In den hier zusammengefassten Fällen werden diese auf der Formel basierenden Überlegungen nicht explizit beschrieben, die Formel liegt der Anwendung jedoch implizit zugrunde. Das folgende Beispiel verdeutlicht dies:

Herr Jasper: „Okay. Gerade in der Mikroelektronik ganz wichtig, dort gibt’s ja ganz, ganz empfindliche Bauteile und wenn dann plötzlich zu VIELE Ladungsträger oder zu starke Ladungsträger durch dieses Bauteil hindurch fließen würden, dann würden die Schaden nehmen. Insofern macht also dieser Widerstand schon seinen SINN. Zum Beispiel eben als Schutz, genau.“ (ABG1,23)

In anderen Fällen werden technische Anwendungen genannt, die sich den Zusammenhang zwischen Widerstand, Stromstärke und Spannung zunutze machen. Beispiele hierfür sind Widerstandsthermometer, regelbare Widerstände als Dimmer oder Lautstärkeregler oder der Phasenprüfer.

Desweiteren fallen durchgeführte oder beschriebene Experimente in diese Kategorie, mit deren Hilfe der Widerstand eines Bauteils oder einer Schaltung untersucht werden soll. Dies geschieht in der Unterkategorie *genannt*, ohne dass der Aufbau und der Zusammenhang der gemessenen und gesuchten Größen explizit beschrieben wird, wie das folgende Beispiel verdeutlicht. In diesem wird zwar beschrieben, welche Größen gemessen, aber nicht, dass und wie daraus der Widerstand bestimmt wird:

Herr Schmitt: „So, wir hatten letzte Woche ein Experiment gehabt [...] Da hatten wir zweimal die Spannung gemessen und zweimal die Stromstärke gemessen und das jeweils an zwei verschiedenen BAUTEILEN.“ (SSG3,4)

Die letzten zwei Ausprägungen der Kategorie, Widerstand als Eigenschaft eines Bauteiles und Isolator oder Schalter, sind in dieser Erhebung nur sehr selten vorgekommen, haben aber durchaus inhaltliche Relevanz, da sie für das Verständnis des Widerstandes und seine Bedeutung in technischen Anwendungen wichtig sind. Die Information, dass alle Bauteile einen Widerstand besitzen und somit den Stromfluss in einem Stromkreis beeinflussen, ist mit der Bedeutung von elektrischem Widerstand als Eigenschaft eines Bauteiles verknüpft und ist somit Teil der Begriffsbildung („Wir wissen, jedes elektrische Gerät hat einen inneren Widerstand“ EPR5, 51). Wenn davon gesprochen wird, dass ein Stromkreis unterbrochen wird oder der Strom nicht durch Isolatoren, wie beispielsweise Luft, fließen kann, kann diese Aussage als Extremfall

$R \rightarrow \infty$ gesehen werden, was zu $I \rightarrow 0$ führt. Das folgende Beispiel verdeutlicht, dass diese Verknüpfung zur Formel nicht ausgeführt wird:

Herr Schmitt: „Theoretisch könnten die auch in die Luft abdiffundieren.“

Nico: „Warum machen die das dann nicht?“

Herr Schmitt: „Puh, warum machen die das nicht? Weil natürlich die Kraft irgendwo erst mal natürlich spüren von dem Leiter (...) und ja, ich sag mal, vielleicht machen es auch ein paar Elektronen. Wenn du mal überlegst, der Blitz da draußen, ist ja auch einfach bloß Elektronen, die durch die Luft durchschießen. Also es ist durchaus möglich, dass bei so einer Batterie vielleicht so eins, zwei natürlich von Trillionen von Elektronen wirklich den Weg durch die Luft finden und vom Pluspol/ Das ist durchaus möglich.“ (SSG5, 162-164)

Für das **Widerstandsgesetz** werden als Beispiele technischer Anwendungen häufig die Reihen- oder Parallelschaltung von Widerständen für die Erzeugung größerer Querschnittsflächen und Längen oder auch Potenziometerschaltungen für Dimmer oder Lautstärkeregler genannt, ohne sie zu erklären:

Herr Weber: „Bei älteren Geräten, die neumodischen, wo die man eh bloß noch mit Fernbedienung bedient, lass ich jetzt mal ein bisschen außen vor. Aber es gab da diese (unv.), wo man die Lautstärke machen kann. Laut. Leise. Und gebe ich gerne zu. Bei vielen ist es kombiniert mit einem Ein- und Ausschalter. Da macht es erst klack und dann kann ich weiterdrehen und dann kann ich es noch lauter machen.“ (KPR10, 75)

Außerdem findet sich neben der oben bereits beschriebenen Ausprägung Experiment die ganz allgemeine Beschreibung bestimmter Materialien als „gute Leiter“, ohne dass dies über den spezifischen Widerstand und die Formel $R = \rho \cdot \frac{l}{A}$ erläutert wird („Wir hatten ja eingangs diskutiert, warum sehen denn im Computer viele Leiterzüge so silbern und so golden aus. Also offensichtlich benutzt man ja auch bestimmte Materialien, um den Widerstand klein zu halten.“ EPR6, 117). Als Beispiele, bei denen die Länge des Kabels relevant ist, werden die Kabellänge beim Experimentieren oder Zuleitungen bei Baustellen oder genannt:

Herr Jasper: „Ein ähnliches Problem könnte eben auch bestehen bei irgendwelchen Konzerten, bei irgendwelchen Festivals, wenn die die Bühne versorgen müssen. Dort ist ja auch nicht immer gleich ein Stromanschluss.

Und diese Kabel, die auf so einer Bühne verlegt werden, diese KabelBÄUME, die Kabelstränge, das sind ja auch ganz viele und dicke Kabel. Das heißt also, alleine nur durch diese Kabel, würde ein ganz schöner Energieaufwand notwendig sein, um die Anlage zu betreiben.“ (ABG6, 42)

Für den Querschnitt nennt eine Lehrerin als Anwendungsbeispiel die Anschlusskabel eines Elektroherds. Das folgende Zitat zeigt, dass auch hier aber kein Zusammenhang zum Widerstand oder zur vom Herd benötigten großen Stromstärke hergestellt wird:

Frau Berger: „Ist deine Zuführung zu dem Elektroherd, ist das genau so ein dünnes Kabel wie das jetzt hier? [...] Also je nach Funktion haben die elektrischen Leiter unterschiedliche Querschnittsfläche. [...] wo die Elektronen im größeren Querschnitt UNGEHINDERTER durchlaufen konnten und wir dann zum Beispiel auch bei den Fernleitungen gesagt hat/ Die haben also auch einen größeren Querschnitt.“ (AWR5, 175-179) ¹¹

Eine weitere Ausprägung der Kategorie, die nur beim Widerstandsgesetz auftritt, ist die Beschreibung von Problemen, für deren Lösung die Formel benötigt wird. An drei Stellen beschreiben LehrerInnen das gleiche Problem, das als Standardaufgabe in fast allen Lehrbüchern auftaucht: Das Widerstandsgesetz soll helfen, einen unterirdischen Kabelbruch zu lokalisieren:

Frau Carle: „Ich könnte zum Beispiel ermitteln, wenn ich jetzt unterhalb/ im Boden so ein Kabel drin, habt ihr bestimmt irgendwo schonmal gesehen, wenn jetzt irgendwo ein Defekt ist, dann buddeln die nicht irgendwo auf, sondern die können vorneweg genau berechnen, wo sie aufbuddeln müssen. Und das heißt einfach auf Grund des Widerstandes.“ (LRR10, 194)

Für das **Ohmsche Gesetz** werden neben der Beschreibung von Experimenten, bei denen die Stromstärke in Abhängigkeit der Spannung gemessen wird, technische Anwendungen genannt, bei denen bei höherer Spannung eine größere Wirkung erzeugt wird: eine Lampe leuchtet heller oder das Wasser im Wasserkocher kocht schneller. Die Stromstärke wird dabei nicht explizit in die Betrachtung miteinbezogen (Herr Weber: „Wenn ich da jetzt fünfhundert Volt anschließe, kocht das Wasser dann noch schneller?“ KPR3, 91).

Für alle drei Formeln werden somit technische Anwendungen genannt und Experimente beschrieben, bei denen in der Formel vorkommende Größen gemessen werden.

¹¹ausführliches Zitat im Anhang unter D.6.3

Zusätzlich gibt es noch einige formelspezifische Ausprägungen der Unterkategorie *Anwendung oder Experiment: genannt*, die jeweils nur bei einer Formel vorkommen (vgl. auch Auflistung zu Beginn dieses Kapitels).

Anwendung oder Experiment: erklärt

Fast alle unter *Anwendung oder Experiment: genannt* beschriebenen Ausprägungen kommen auch in einer ausführlicheren Variante vor, in der die Zusammenhänge detailliert und mit Bezug auf die Formel oder zumindest mit explizitem Einbezug des Zusammenhanges der in der Formel vorkommenden Größen beschrieben werden (s. Diagramm D.12 im Anhang). Ein Beispiel für die Erklärung einer technischen Anwendung zeigt das folgende Beispiel:

Frau Berger: „Wie bestimmt die Scannerkasse das Gewicht oder die Masse des Apfels? [...] Also das Gewicht des Apfels (...) drückt auf so einen Dehnungsmessstreifen. Dieser verändert dadurch seine Länge und damit seinen elektrischen Widerstand. (...) Und je stärker das Gewicht ist, umso mehr wird die Länge des Dehnungstreifens verändert und ihr könnt dann (...) praktisch über Messwandlungen die Masse ablesen.“ (AWR5, 139)

Bei der Erklärung technischer Anwendungen wird häufig auch der regelbare Widerstand oder das Potenziometer ausführlich beschrieben (6 der 16 Codierungen, die für das Widerstandsgesetz unter technische Anwendung fallen). Ein weiteres Beispiel ist das folgende Zitat, in dem der Lehrer mit Hilfe der Größen Stromstärke, Widerstand und Querschnittsfläche (hier: „Dicke“) die Verwendung großer Querschnittsflächen bei der Notwendigkeit großer Längen beschreibt:

Herr Lenz: „Und wir werden auch sehen, unsere Kabel, die in den Leitungen liegen, wo wir HOHE Spannungen haben und demnach auch hohe Stromstärken fließen und wo wir elektrische Energie über große Distanzen transportieren, die sind ja alle nicht so dünn. Die sind ja alle ziemlich DICK und das genau aus dem Grund, weil die dort einen geringen Widerstand haben. Brauchen wir halt zum Übertragen über LANGE Entfernungen, DICKE Leitungen. Der Nachteil bei dicken Leitungen ist natürlich, ich brauch viel Material und das wird teuer. Für unsere Zwecke hier als Schülerexperimente reichen solche dünne Kabel, weil dann immer noch der Spannungsabfall niedrig genug ist, dass wir nicht all zu viel verlieren. Für LANGE Strecken ist das aber wirklich relevant. Wir brauchen dicke Kabel.“ (HBG3, 114)

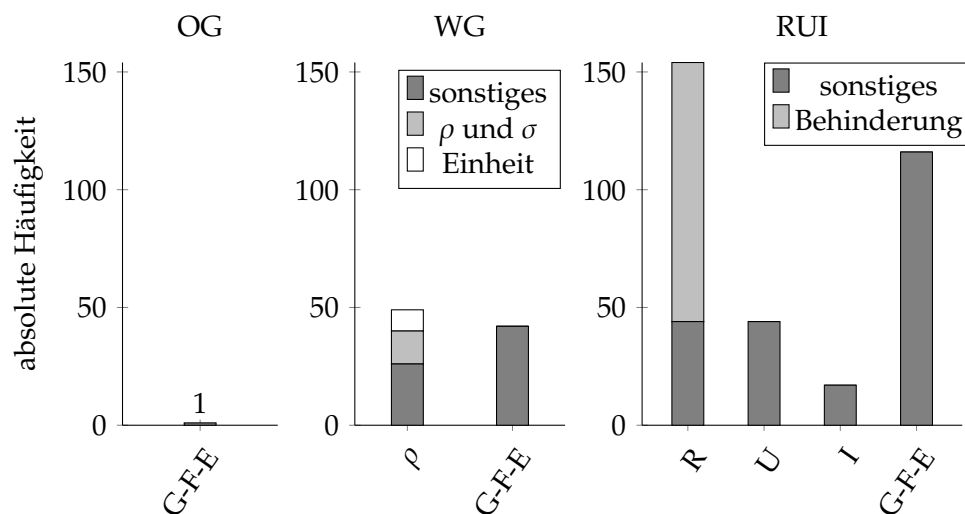


Abbildung 12.20.: Codehäufigkeiten verschiedener Termini zu *Beschreibung einzelner Größen*; G-F-E...Größe-Formelzeichen-Einheit

12.2.7. Beschreibung einzelner Größen

Das Verständnis einzelner in der Formel vorkommender Größen ist Voraussetzung für das Verständnis einer Formel selbst, also des Zusammenhanges der Größen. Daher werden unter *Beschreibung einzelner Größen* Aussagen gefasst, bei denen alltagsnahe Umschreibungen oder Bilder für die Begriffe genannt werden, die in der Formel miteinander in Beziehung gesetzt werden. Voraussetzung für eine Konnotation des begrifflichen Konzeptes eines physikalischen Terminus mit einer Formel ist die richtige Zuordnung der Termini zu den in der Formel genutzten Formelzeichen. Auch eine Kenntnis der zugehörigen Einheit ist für ein Verstehen der Größe selbst Grundlage. Daher beinhaltet diese Kategorie auch die explizite Verknüpfung von Formelzeichen, Größen und Einheiten.

Die Kategorie *Beschreibung einzelner Größen* tritt zahlenmäßig recht häufig auf (vgl. Diagramm 12.9 zu Beginn des Kapitels). Die Verteilung auf die einzelnen Termini ist dabei durchaus heterogen (vgl. Diagramm 12.20). Die meisten Codierungen fallen dabei deutlich auf den elektrischen Widerstand.

Für das **Ohmsche Gesetz** gibt es nur eine Codierung, was damit zu erklären ist, dass die meisten Aussagen zu Spannung und Stromstärke zur Definitionsformel des Widerstandes $R = \frac{U}{I}$ gezählt werden, da die Aussagen in Zusammenhang mit dieser Formel gemacht werden, auch wenn häufig das Ohmsche Gesetz zeitlich vor der Definitionsformel behandelt wird.

Für das **Widerstandsgesetz** werden Aussagen zur Größe ρ , dem spezifischen elektrischen Widerstand, gemacht. Dies kann darauf hindeuten, dass die weiteren in der Formel vorkommenden Größen, Länge l und Querschnittsfläche A , als geometrische Größen aus dem Mathematikunterricht bereits bekannt und auch sehr anschaulich sind. Vermutlich aus diesem Grund werden diese Größen von den LehrerInnen in der hier untersuchten Stichprobe nicht näher erläutert.

Die Aussagen zum spezifischen Widerstand enthalten zum einen Erklärungen der Einheit des spezifischen Widerstandes ($\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$) (Zitat (1)). Zum anderen werden Aussagen zum Zusammenhang des spezifischen elektrischen Widerstandes ρ und der Leitfähigkeit σ eines Materials gemacht. Dies geschieht nicht über den algebraischen Zusammenhang $\rho = \frac{1}{\sigma}$, sondern durch eine halbquantitative Verknüpfung der Größen oder eine Beschreibung der elektrischen Leitfähigkeit als Materialeigenschaft, ohne Zuordnung eines entsprechenden Zahlenwertes für die Leitfähigkeit (Zitat (2)).

(1) Herr Lenz: „Mein spezifischer Widerstand gibt mir an, (7 s) wie viel Ohm (8 s) bei einem gewissen Widerstand in Kubikmillimeter [sic], das ist immer das, was ihr im Lehrbuch findet, deshalb schreib ich es mal so auf, in Grundeinheit wäre es natürlich Meter. (...) Bei einem Meter Länge zu erwarten ist. Wir haben hier ja eine Fläche Quadratmillimeter. (...) Kubikmillimeter wäre ja ein Volumen. (...) Also, wie viel Ohm hat ein Material, bei einer Fläche von ein Millimeter auf einem Meter Länge?“ (HBG3, 125)

(2) Frau Berger: „Weil da der niedrigste spezifische elektrische Widerstand angegeben ist. Das ist praktisch eine KENNGRÖßE. Je kleiner dieser spezifische elektrische Widerstand ist, umso besser Leiter [sic] dieser Stoff.“ (AWR5, 123)

Unter sonstige Beschreibungen des spezifischen elektrischen Widerstandes fallen Aussagen, bei denen dieser als Proportionalitätsfaktor in der Gleichung bezeichnet wird („Rho drei Pünktchen Proportionalitätsfaktor“ SBG5, 38) oder als eine materialabhängige Kenngröße, die im Tafelwerk nachzuschlagen ist („Das heißt also, jeder STOFF hat einen sogenannten SPEZIFISCHEN Widerstand. Das ist also eine feste konstante Größe, die hatten wir ermittelt und die findet ihr in eurem Tafelwerk.“ LRR10, 116).

Für die **Definitionsformel** $R = \frac{U}{I}$ werden alle drei vorkommenden Größen (Widerstand, Spannung, Stromstärke) mit anderen Worten umschrieben. Der Widerstand wird besonders häufig als Maß für die Behinderung des Stromes beschrieben (110 von 154 Textstellen für den Widerstand), dies wird oft auch im Modell der Elektronen-

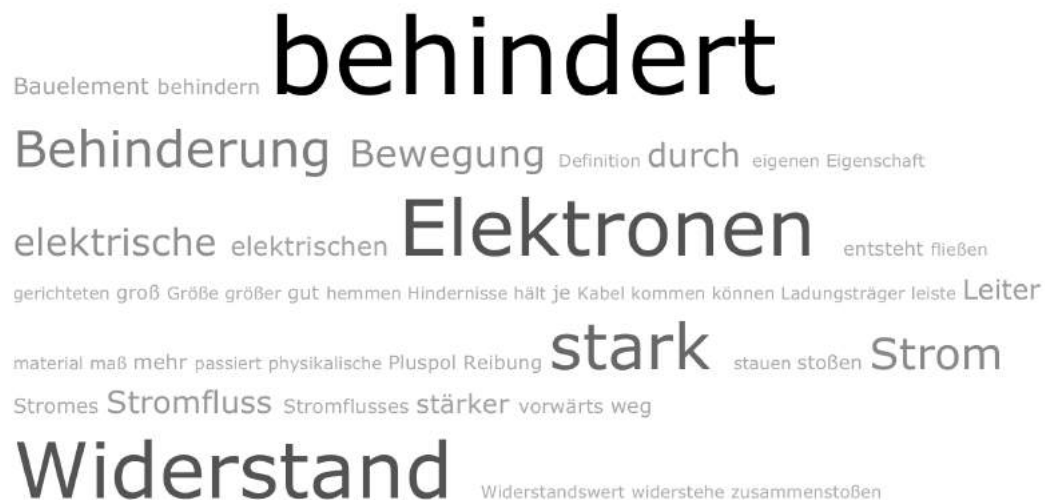


Abbildung 12.21.: Wortwolke zu den codierten Textstellen für die Beschreibung des Widerstandes

leitung erklärt. Die Wortwolke in Abbildung 12.21 verdeutlicht dies.¹² Deutlich ist zu erkennen, dass die Wörter Behinderung und behindert häufiger vorkommen als andere. Diese Einigkeit in der Unterrichtssprache spiegelt sich auch in den Tafelbildern zur Einführung des Widerstandes mit den jeweiligen Definitionen wider. Durchweg wird der Widerstand (eines Bauteils oder Leiters) beschrieben als Maß für die Behinderung des elektrischen Stromes oder der Elektronen (in ihrer Bewegung) (s. Abb. 12.23).

Weitere Bilder für den Widerstand, die auch in der Wortwolke (Abb. 12.21) zu finden sind, sind der Stau von Elektronen, das Stoßen mit Gitterbausteinen oder die Reibung. Herr Schmitt umschreibt den Widerstand als Maß dafür, „wie kompliziert der Weg“ des Elektrones (SSG 2, 102) ist und beschreibt mit diesem Bild implizit auch das Konzept der am Widerstand abfallenden Spannung (Zitat unten). Dies spiegelt sich auch in der von ihm verwendeten Analogie der Tür wider, die unter 12.2.9 näher beschrieben wird. Das Konzept der abfallenden Spannung wird in anderen Beschreibungen nicht verwendet.

Herr Schmitt: „Das spüren die [Elektronen] durch die Anziehungskraft.
Durch die Anziehungskraft kriegen die mit, wie viele Hindernisse liegen

¹²Die Wortwolke wurde mit Hilfe von MAXQDA 11 für Mac erstellt. Hierfür wurden die Codings der Kategorie *einzelne Größen werden beschrieben - Widerstand* als Grundlage einer Worthäufigkeitsanalyse genutzt. Die Größe der dargestellten Worte repräsentiert ihre Häufigkeit. Groß- und Kleinschreibung wurde nicht als unterscheidendes Merkmal beachtet. Von der Analyse ausgeschlossen wurden Präpositionen, Pronomen, Zahlen und weitere Wörter, die in keinem direkten Bedeutungszusammenhang zum Widerstand stehen, wie beispielsweise Dokument, Stunde, Punkt, gesagt.

auf meinem Weg.“ (SSG2, 105)

Für die Spannung werden die Begriffe Elan, Antrieb oder auch Energie, in einzelnen Fällen auch Kraft oder Druck genutzt (vgl. Wortwolke in Abb. 12.22). Die Stromstärke wird als Maß dafür, wie viele Ladungsträger pro Sekunde durch den Querschnitt eines Leiters fließen, beschrieben. Selten wird dies unterrichtssprachlicher formuliert (z. B. „die Stromstärke ist einfach nur die ANZAHL der Elektronen, die in einer Sekunde irgendwo gezählt werden, an einer ganz bestimmte Stelle“ SSG4, 100).



Abbildung 12.22.: Wortwolke zu den codierten Textstellen für die Beschreibung der elektrischen Spannung

Für alle drei Formeln findet sich die Verknüpfung der Größen mit ihren Formelzeichen und Einheiten. Häufig geschieht dies in der Form, dass eine Größe als festes Schema mit zugehörigem Formelzeichen und Einheit eingeführt wird (Tafelbild in Abb. 12.23) und dann auch als dieser feste „Dreiklang“ aus Größe, Formelzeichen und Einheit von den SchülerInnen als abrufbares Wissen, ähnlich wie beim Vokabellernen im Fremdsprachenunterricht, verlangt wird (vgl. Zitat unten). In anderen Fällen wird die Größe direkt in Kombination mit ihrem Formelzeichen gesprochen oder geschrieben (z. B. „Länge l “, LRR10, TB).

Herr Schmitt: „Was war das Formelzeichen der Stromstärke, Anna?“

Anna: „ I . Ist (es?) I ?“

Herr Schmitt: „Jawoll, sehr schön. Was war die Einheit der Stromstärke, Tom?“

Tom: „Ein Ampere.“

Herr Schmitt: „Jawoll.“ (SSG1, 56-60)

Der elektrische Widerstand

Der elektrische Widerstand gibt an, wie stark die Elektronen in ihrer Bewegung behindert werden.

Formelzeichen R

Einheit 1Ω (Omega ... Ohm)

Abbildung 12.23.: Abschrift eines Tafelbilds mit der Einführung des Widerstandes mit zugehörigem Formelzeichen und zugehöriger Einheit (KPR4, TB)

Vergleich der LehrerInnen: Die Kategorie *Beschreibung einzelner Größen* tritt bei allen hospitierten LehrerInnen auf. Betrachtet man die Verteilung der Aussagen der Kategorie für die Größen Widerstand, Spannung, Stromstärke und spezifischer elektrischer Widerstand auf die unterschiedlichen Lehrer (Diagramm D.14 im Anhang), so fällt auf, dass auf einige LehrerInnen sehr viele Codierungen fallen (Herr Schmitt: 53, Frau Müller: 49), während andere nur sehr wenige Codierungen aufweisen (Herr Lenz: 2, Herr Funke, 3). Es scheint somit LehrerInnen zu geben, die sehr viel Wert auf die Wiederholung und Bildung der einzelnen Begriffe legen und andere, bei denen dies in den hospitierten Stunden weniger ins Gewicht fällt. Auch die Verknüpfung von Größen mit ihren Formelzeichen und Einheiten kommt bei allen LehrerInnen vor (vgl. Diagramm D.15 im Anhang). Die LehrerInnen mit den meisten Verknüpfungen sind MittelschullehrerInnen (Frau Gerber: 36, Herr Meyer: 27, Herr Weber: 23).

12.2.8. Modell

Bei dieser Kategorie werden die in der Formel vorkommenden Größen und ihr Zusammenhang mit Hilfe physikalischer Modelle veranschaulicht. Bei allen drei in der Erhebung vorkommenden Formeln ist das einzige vorkommende Modell das Modell der Elektronenleitung. Bei diesem Modell wird der elektrische Strom als Bewegung von Elektronen durch einen metallischen Leiter dargestellt. Durch Stöße mit den vorhandenen Gitterbausteinen im Leiter wird diese Bewegung behindert. Die Kategorie kommt bei allen LehrerInnen vor, unterscheidet sich jedoch deutlich in ihrer Häufigkeit (vgl. Diagramm D.13 im Anhang). Es gibt zum einen die Gruppe der LehrerInnen, die Modelle im hospitierten Unterricht sehr häufig benutzen, und zum anderen die Gruppe derer, die Modelle nur sehr wenig benutzen.

Insbesondere bei der **Definitionsformel** $R = \frac{U}{I}$ wird das Modell der Elektronenleitung oft genutzt (vgl. Diagramm D.13 im Anhang). Dies ist darin zu begründen, dass

die Formel den Widerstand definiert und somit alle Erklärungen des Widerstandes im Modell der Elektronenleitung codiert wurden. Häufig wird das Modell auch genutzt, wenn die Vergrößerung des Widerstandes bei erhöhter Temperatur beschrieben werden soll. Ein Bezug zur Formel wird bei den meisten Textstelle nicht explizit hergestellt (Zitat (1)). Ein Beispiel für ein stärkeres Verknüpfen mit der Formel ist das Zitat (2). In einigen Fällen wird das Modell durch ein Tafelbild (vgl. Abb. 12.24) visualisiert oder als Analogiespiel umgesetzt (bei den Mittelschullehrerinnen Frau Berger, Frau Carle und Frau Gerber), indem einzelne SchülerInnen Gitteratome darstellen, die sich wenig an ihrem festen Platz bewegen, und andere SchülerInnen Elektronen spielen, die vom Minus- zum Pluspol wandern.

(1) Herr Jasper: „Das heißt also, je dichter die Atome des Drahtes gepackt sind, umso schwerer haben es die Ladungsträger, da durch zu kommen. Wenn sie nicht so dicht gepackt sind, dann ist es für die Elektronen wesentlich leichter, durchzuwuseln. So kann man sich das auch vorstellen.“ (ABG1,27)

(2) Herr Schmitt: „Die AtomRÜMPFE, die Teilchen BEWEGEN sich schneller (...) und somit brauche ich MEHR Spannung, um einen ÄHNLICHEN Strom zu erzeugen. Das heißt also, der Widerstand WÄCHST, wenn der Draht wärmer wird.“ (SSG4,194)

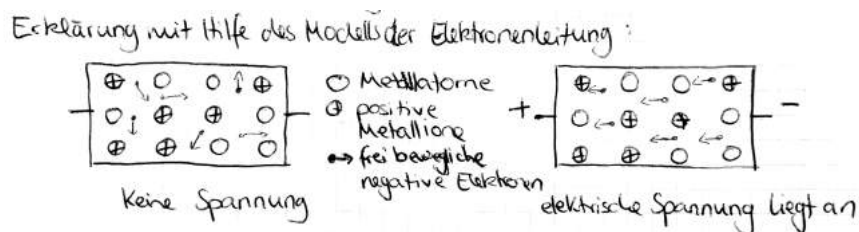


Abbildung 12.24.: Abschrift Tafelbild zum Modell Elektronenleitung (AWR4, TB)

Für das **Widerstandsgesetz** wird das Modell insbesondere genutzt, um das Entstehen eines größeren Widerstandes bei längeren Leitern zu begründen, da die Elektronen auf ihrem Weg mit mehr Gitterbausteinen zusammenstoßen (Zitat (3)). Der spezifische Widerstand wird durch die materialspezifische „Dichte“ an Gitterbausteinen veranschaulicht (Zitat (4)) oder fachlich korrekter beschrieben, dass es mit der Gitterstruktur des Materials zusammenhängt (Zitat (5)).

(3) Herr Lenz: „die Elektronen die müssen häufiger irgendwie an diesen Gittersteinen vorbei, dafür / von werden die immer stärker abgebremst. Je

länger das Kabel, an so mehr Gitterstellen müssen sie vorbei, dadurch wird der Widerstand größer.“ (HBG3, 89)

(4) Frau Müller: „Also es kommt, richtig, es kommt darauf an, sozusagen wieviele solcher Teilchen HABE ich denn und natürlich auch, wie dicht liegen diese Teilchen beieinander. Je dichter sie liegen, desto schwerer wird es ja wahrscheinlich für das Elektron, da durch zu kommen. Jedes Material haben wir in der Klasse sechs gelernt, ist anders aufgebaut. Alle bestehen zwar aus Atomen, aber wir haben keine gleichen Atome in zwei verschiedenen Stoffen. Und das heißt, wir haben auch verschiedene Restione übrig in den Stoffen. Und da sind verschieden viele/ da sind verschiedene Dichten da und so weiter. Das heißt, jedes Material ist anders als andere Materialien. Kein Material ist gleich. Und deswegen ist die Behinderung auch in jedem Material eine andere.“ (BTR5, 95)

(5) Herr Schmitt: „Der [Widerstand] hängt erst mal davon ab, wie beispielsweise das Metall aufgebaut ist. Das heißt, ist es vielleicht, jetzt mal ganz einfach bildlich gesprochen, ist es eine Gitterstruktur, die irgendwo schön ist. Das heißt, sind die Teile so regelmäßig angeordnet, dass da die Elektronen einfach durchhuschen können. Dann natürlich wie VIELE Elektronen sind dort tatsächlich bereit gestellt, ist es ein Stoff, der keine freien Elektronen hat, ist es ein Stoff, der viele freie Elektronen hat, da spielt vieles eine/ mit rein, bei dieser/ diesem spez/ spezifischen elektrischen Widerstand. Hat prinzipiell mit der DICHTTE nicht so viel zu tun.“ (SSG8, 57)

12.2.9. Analogie

Für die Verdeutlichung des Zusammenhanges von Widerstand, Spannung und Stromstärke und die Zusammenhänge des Widerstandsgesetzes werden in einigen Fällen Analogien genutzt. Für das Ohmsche Gesetz konnten keine Analogien im beobachteten Unterricht identifiziert werden.

Die Analogien lassen sich für die **Definitionsformel** in zwei thematische Kategorien aufteilen: Die Analogie der Reibung („Die [Elektronen] reiben am Widerstand.“ ABG1, 86) und der Straße. Die Straßenanalogie umschreibt dabei die Stromstärke als Anzahl der Autos oder Fußgänger, die in einer festen Zeiteinheit an einem bestimmten Ziel ankommen. Wenn der Weg voller Hindernisse (querende Fußgänger, Stau) ist, dann kommen weniger an, die Stromstärke ist kleiner. Das folgende Zitat ist ein Beispiel für die Straßenanalogie:

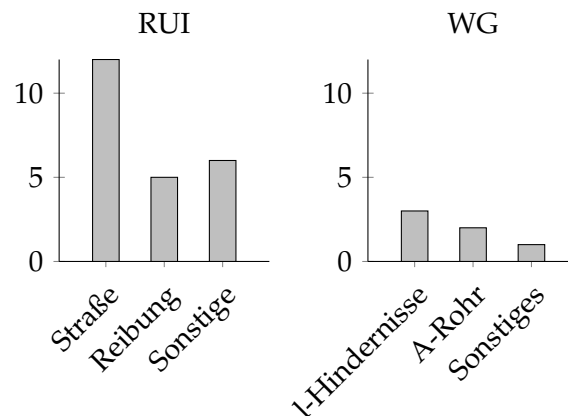


Abbildung 12.25.: Codehäufigkeiten Unterkategorien zu *Analogie*

Frau Müller: „Das ist, wie wenn ich zur Hauptverkehrszeit, zum Beispiel wenn Weihnachtsmarkt ist, vom Hauptbahnhof zum Karstadt will. Da stoße ich DAUERND gegen irgendwelche Leute, die an den Buden rumstehen. Massen Leute, ne? So ungefähr ist das. Ich will als Elektron quasi von Minus- zum Pluspol und STÄNDIG steht mir jemand im Weg. Und den muss ich umschiffen. An den prall ich auch mal, dann werd ich wieder zurückgestoßen sozusagen. Und genau das passiert mit den Elektronen auf ihrem Weg vom Minus- zum Pluspol.“ (BTR2, 260)

Weitere Analogien, die für die Beschreibung des Widerstandes und somit auch der Formel $R = \frac{U}{I}$ genutzt werden, sind die Wasserkreislaufanalogie und ein Comic, bei dem ein Ampere-Männchen sich durch ein Rohr quetscht, das von einem Ohm-Männchen zusammengezogen wird, während ein Volt-Männchen das Ampere-Männchen von hinten durch die entstandene Verengung drückt. Interessant ist die ausschließlich bei Herrn Schmitt auftauchende Tür-Analogie, die, wie in Abschnitt 12.2.7 bereits angedeutet, auch die Spannung als anziehende Kraft interpretiert:

Mia: „Woher können die Elektronen wissen, dass, wenn sie den längeren Weg nehmen, dass sie da zwei Widerstände haben, wenn sie den kürzeren und breiteren Weg nehmen, nur einen Widerstand? Das riechen die ja nicht.“

Herr Schmitt: „Jule weiß es.“

Jule: „Ja und zwar können sie das durch die Anziehung spüren, weil die ist / die werden ja vom Pluspol angezogen und wenn da irgendwas als

Hindernis ist, dann wird die Anziehung schwächer.“

Mia: „Aber nehmen wir mal an, ich werde jetzt vom Essen angezogen (unv.) wenn ich zwei Türen (unv.)“

Herr Schmitt: „Doch. Doch, doch. Angenommen / mach mal, angenommen / wenn wir es wirklich mal / natürlich wir vermenschlichen das gerade so ein bisschen, die Elektronen riechen das nicht. Aber gehen wir mal auf diese menschliche Basis. Du riechst doch im Endeffekt, ob ein Essen im Endeffekt, ob / ob die Tür offen ist oder ob die Tür zu ist. Das riechst du doch. Das heißt, ob du die Tür vorher aufmachen musst oder ob du durch eine offene Tür gehen kannst. Das riechst du doch.“ (SSG4, 38-42)

Für das **Widerstandsgesetz** findet sich für die Länge die Analogie, dass bei einem längeren Weg mehr Hindernisse im Weg sind und damit das Elektron stärker aufgehalten wird. An einer Stelle wird dies explizit mit der zuvor für $R = \frac{U}{I}$ verwendeten Straßenanalogie verknüpft, bei einer längeren Straße gibt es entsprechend mehr Menschen, die im Weg stehen. Der Querschnitt wird von zwei LehrerInnen mit einem großen oder kleinen Rohr verglichen:

Frau Gerber: „Wir haben jetzt ein Rohr, dessen Querschnittsfläche relativ groß ist. Wir haben beispielsweise einen Durchmesser vom Rohr zwei Meter. Könnt ihr euch das vorstellen? Schon größer oder? So, jetzt wollen wir durch dieses Rohr hindurch. Wir alle. [...] Da können wir durchlaufen. [...] Jetzt stellt euch mal vor, wir würden dieses Rohr (...) verkleinern. Also wir würden ein Rohr nehmen, wo wir vielleicht bloß noch einen Meter haben. (4s) Und wollen da auch durch. (...) Müssen wir ganz schön kriechen. [...] Also, wo können wir besser hindurch? Großes Rohr oder kleines Rohr?“ (KTH5, 37-43) ¹³

Vergleich der LehrerInnen: Bei der Kategorie *Analogie* ist die Verteilung auf die einzelnen LehrerInnen besonders interessant. Herr Schmitt hat alle vorkommenden Analogien genutzt (Straße, Reibung, Tür, Comic, Wasserkreislauf, Hindernisse und Rohr). Auf ihn fallen 17 der insgesamt 29 codierten Textstellen. Frau Müller benutzt nur die Analogie der Straße und wendet diese für beide Formeln an. Frau Gerber nutzt die Analogie der Straße für $R = \frac{U}{I}$ und die Rohranalogie für den Durchmesser im Widerstandsgesetz. Alle anderen Stellen fallen auf unterschiedliche LehrerInnen, die jeweils nur an einer Stelle im Unterrichtsverlauf eine einzelne Analogie punktuell

¹³ausführliches Zitat im Anhang unter D.6.4

nutzten (s. Tab. D.3 im Anhang). Der Unterschied zwischen den LehrerInnen ist hier somit sehr groß: Es gibt einen sehr extensiven Analogie-Nutzer (Herr Schmitt) und zwei LehrerInnen, bei denen Analogien an verschiedenen Unterrichtsstellen vorkommen (Frau Müller und Frau Gerber). Bei allen anderen LehrerInnen tauchen Analogien nur einmalig und somit sehr punktuell auf.

12.3. LehrerInnen sprechen über Formeln

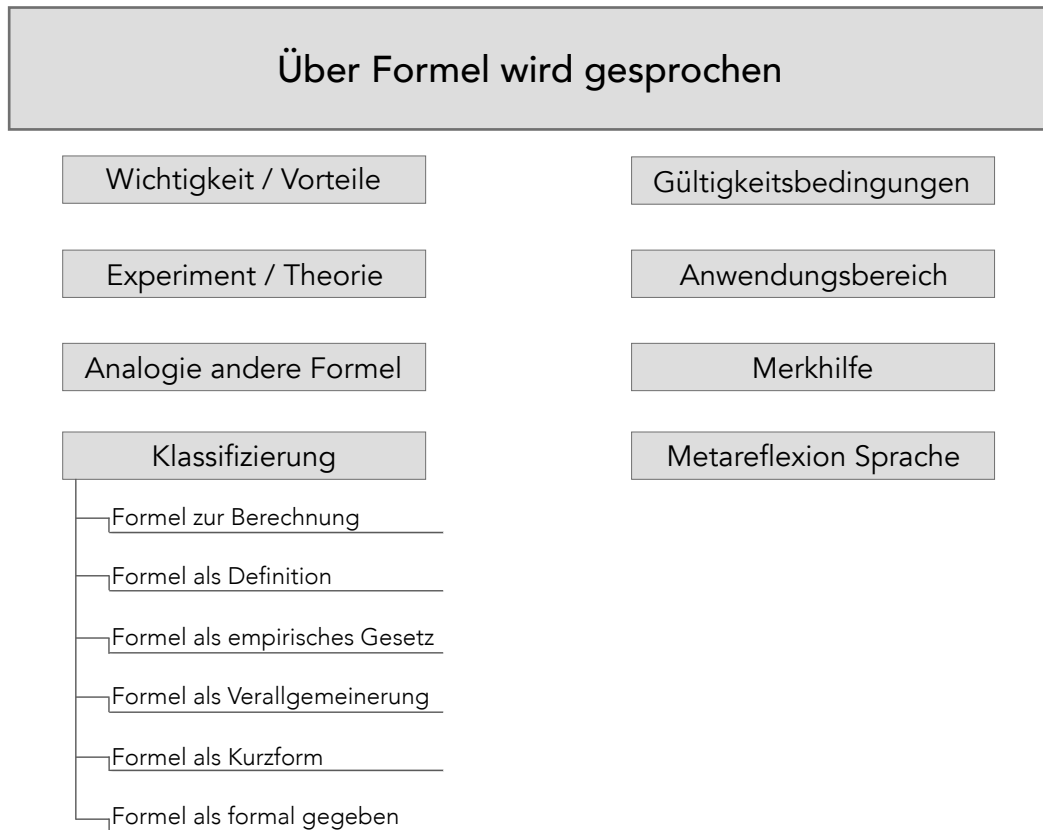


Abbildung 12.26.: Kategorien der Oberkategorie *Über Formel wird gesprochen*

Die Oberkategorie *Über die Formel wird gesprochen* umfasst Äußerungen der LehrerInnen, die auf einer Meta-Ebene die jeweilige Formel betreffen. Die Äußerungen, die in diese Oberkategorie fallen, lassen eine übergeordnete Sichtweise auf Formeln allgemein oder eine Formel im Speziellen erkennen. Sie betreffen also nicht die inhaltlichen Aussagen einer Formel, wie in der Oberkategorie *Formel wird angewendet oder interpretiert*, sondern sie stellen epistemologische Sichtweisen und Überzeugungen dar, beschreiben damit explizit oder implizit die Art der Aussagen, die eine Formel macht, und reflektieren die Rolle von Formeln innerhalb der Naturwissenschaft Physik und des Physikunterrichts. Diese Reflexion und Bewertung von Formeln geschieht dabei meist eher implizit. Die Oberkategorie ist deckungsgleich mit der Meta-Ebene des Ebenenmodells (s. Kapitel 5.4).

Die Abbildung 12.26 zeigt die in der Erhebung identifizierten Kategorien. Diese haben zum Teil stark analytischen Charakter. Die induktive Bildung von Kategorien und die Identifikation von Codings zu einer Kategorie in dieser Oberkategorie ist daher stärker vom jeweiligen theoretischen Vorwissen des Forschenden abhängig.¹⁴

Die Kategorien beschreiben eine konkrete Formel und ihre Anwendungsmöglichkeiten näher, indem beispielsweise Gültigkeitsbedingungen und Anwendungsbereiche der Formel beschrieben werden. Andere Kategorien beschreiben Vorteile einer Formel gegenüber anderen Darstellungsformen, grenzen durch Formeln errechnete Werte und Aussagen von experimentell ermittelten ab oder klassifizieren Formeln epistemologisch (erkenntnistheoretisch). Die Kategorien *Analogie andere Formel*, *Merkhilfe* und *Metareflexion Sprache* verknüpfen Formeln mit anderen Wissensressourcen und tragen somit dazu bei, dass eine Formel und ihre Aussagen stärker verknüpft werden können.

Die Oberkategorie *Über die Formel wird gesprochen* ist zahlenmäßig insgesamt eine kleine Kategorie und macht nur 15% aller Codierungen aus (s. Diagramm 12.1). Die Häufigkeitsverteilung der Kategorien in Diagramm 12.27 zeigt deutlich, dass die meisten Aussagen unter die Kategorie *Klassifizierung* fallen. Diese ist die einzige Kategorie, die mehrere Unterkategorien aufweist. Somit ist die Kategorie *Klassifizierung* inhaltlich deutlich breiter aufgestellt als die anderen Kategorien, was die zahlenmäßigen deutlichen Unterschiede erklären kann. Auffällig ist auch, dass im Gegensatz zu den Verteilungen unter *Formel wird gesprochen* und *Formel wird angewendet oder interpretiert* auf die Definitionsformel $R = \frac{U}{T}$ nur in 4 der 8 Unterkategorien die meisten der Codierungen fallen. Insbesondere auf das Widerstandsgesetz fallen in den Kategorien *Wichtigkeit / Vorteile*, *Experiment / Theorie* und *Anwendungsbereich* viele Codings, beim Ohmschen Gesetz wird häufiger als bei den anderen Formeln über Gültigkeitsbedingungen gesprochen. Dies zeigt, dass hier deutliche Unterschiede zwischen den drei in der Erhebung relevanten Formeln von den LehrerInnen gemacht werden, da diese Häufigkeiten nicht mit dem Umfang, in dem die Formeln im Unterricht behandelt werden, erklärt werden können, wie es bei den meisten anderen Kategorien unter *Formel wird gesprochen* und *Formel wird angewendet oder interpretiert* der Fall ist.

Die Kategorie *Über die Formel wird gesprochen* tritt bei allen LehrerInnen auf. Bis auf zwei LehrerInnen sprechen auch alle LehrerInnen über alle drei in dieser Erhebung berücksichtigten Formeln auf dieser Meta-Ebene (s. Diagramm D.17 im Anhang).¹⁵

¹⁴Dies spiegelt sich auch in den im Vergleich zu den anderen Kategorien schlechteren Interkoder-Übereinstimmungen wider, die im Anhang unter C.1 dargestellt und erläutert werden.

¹⁵Die Ausnahmen sind Frau Gerber und Herr Lenz. Bei Frau Gerber kommen keine Meta-Äußerungen zum Widerstandsgesetz vor. Dies ist dadurch zu erklären, dass sie das Widerstandsgesetz in Konformität mit dem sächsischen Lehrplan für den Hauptschulbildungsgang der Mittelschule nicht als Formel behandelt. Herr Lenz spricht nicht explizit über das Ohmsche Gesetz und macht daher auch

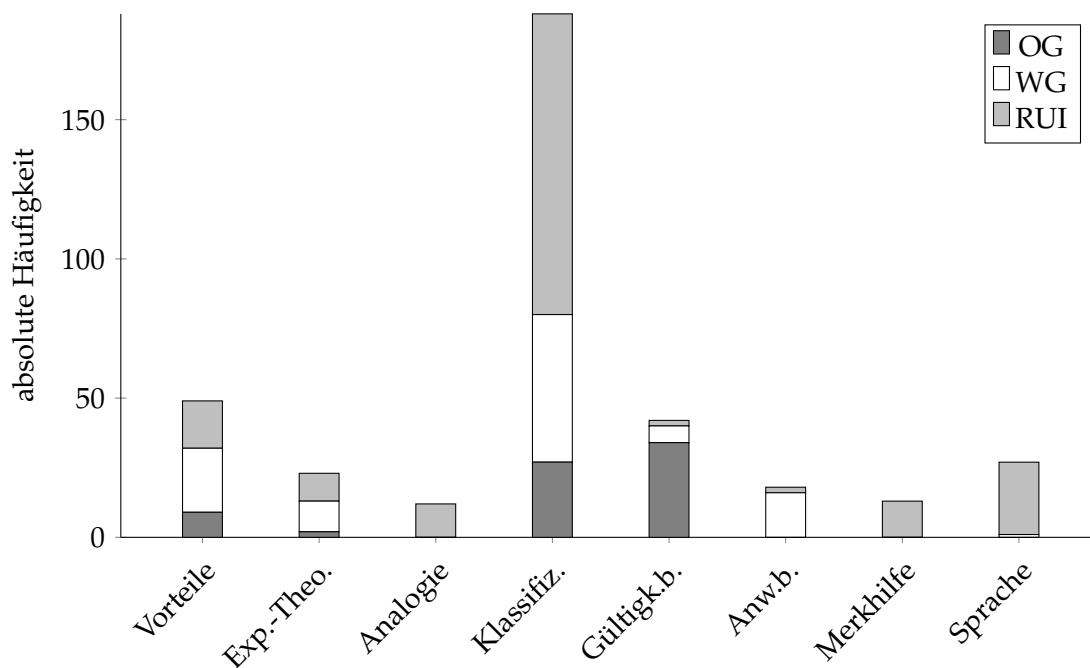


Abbildung 12.27.: Codehäufigkeiten Unterkategorien zu *Über Formel wird gesprochen*

Insgesamt tritt diese Kategorie bei allen LehrerInnen seltener auf als die anderen beiden Oberkategorien *Formel wird gesprochen* und *Formel wird angewendet oder interpretiert*.¹⁶

Die Verteilung der Kategorien insgesamt, wie sie in Diagramm 12.27 dargestellt wird, spiegelt sich grob auch bei den einzelnen LehrerInnen wider. Bei allen LehrerInnen tritt die Kategorie *erkenntnistheoretische Klassifizierung der Formel* am häufigsten auf (s. Diagramme D.18 im Anhang). Bei jeder Lehrkraft gibt es mindestens eine Unterkategorie, die gar nicht auftritt, jedoch treten alle Kategorien bei mindestens 4 der 10 hospitierten LehrerInnen auf. 6 der 8 Kategorien können bei mindestens 8 der 10 LehrerInnen identifiziert werden, sodass hier trotz der insgesamt geringen Anzahl an Codierungen eine gute Übertragbarkeit auf andere LehrerInnen und damit eine gewisse Relevanz der einzelnen Kategorien für Physikunterricht als Ganzes gegeben zu sein scheint. Die zwei Kategorien, die nur bei jeweils 4 von 10 LehrerInnen auftreten sind *Merkhilfe* und *Analogie zu anderen Formeln*.¹⁷

keine Meta-Aussagen zum Ohmschen Gesetz, da er fälschlicher Weise die Definitionsformel $R = \frac{U}{I}$ als Ohmsches Gesetz bezeichnet.

¹⁶Einzige Ausnahme hier ist Herr Weber, der 22 Codierungen in der Kategorie *Über Formel wird gesprochen* und 21 Codierungen in der Kategorie *Formel wird gesprochen* aufweist. Er spricht somit einmal mehr *über* eine Formel, als dass er Formeln selbst spricht. Insbesondere spricht er auch *über* das Widerstandsgesetz, ohne dass das Widerstandsgesetz selbst von ihm gesprochen oder geschrieben würde (s. Diagramme D.3 und D.17 im Anhang).

¹⁷Ein Aspekt des Sprechens *über* eine Formel wurde nur von einem einzigen Lehrer genannt und wird

Bei der Oberkategorie *Über Formel wird gesprochen* ist auch auf der Ebene der LehrerInnen der Unterschied zwischen den einzelnen Formeln recht deutlich zu erkennen. Die Kategorien, die für eine Formel von fast allen LehrerInnen genannt werden, sind hier je nach Formel unterschiedlich (s. für eine genaue Aufschlüsselung der Verteilung die Tabellen D.4, D.5 und D.6 im Anhang). Die Tabelle 12.2 gibt einen Überblick, von wie vielen LehrerInnen die einzelnen Kategorien für die unterschiedlichen Formeln genannt werden. Aus der Übersicht ist zu erkennen, dass die Kategorie *Erkenntnistheoretische Klassifizierung* bei allen drei Formeln zu den von den meisten LehrerInnen angesprochenen Aspekten zählt. Für die Definitionsformel werden außerdem die Kategorie *Metareflexion Sprache* und *Wichtigkeit/Vorteile* von besonders vielen LehrerInnen benannt, für das Widerstandsgesetz die *Wichtigkeit/Vorteile* und der *Anwendungsbereich*. Beim Ohmschen Gesetz sprechen viele LehrerInnen auch über die *Gültigkeitsbedingungen*. Hier zeigt sich somit aufgrund der zahlenmäßigen Ausprägungen der gefundenen Kategorien, dass alle LehrerInnen auf einer Meta-Ebene Unterschiede zwischen den einzelnen Formeln implizit thematisieren, indem sie je nach Formel und ihren Eigenschaften unterschiedliche Aspekte ansprechen. Besonders deutlich wird sich dieser Unterschied auch noch bei der genaueren Beschreibung und Analyse der Kategorie *Erkenntnistheoretische Klassifizierung* in Kapitel 12.3.4 zeigen.

darum nicht als eine eigenständige Kategorie aufgefasst. Hier müsste sich zunächst durch weitere Hospitationen bei einer anderen Stichprobe zeigen, ob dieser Aspekt übertragbar ist. Dieser Aspekt betrifft die Betonung des Gleichungscharakters einer Formel. Bei Herrn Meyer wurden 3 Unterrichtsstellen identifiziert, bei denen er betont, dass eine Formel immer eine Gleichung sei und darum zwei Seiten habe, die durch ein Gleichheitszeichen miteinander verbunden würden: „Eine GLEICHUNG hatte ich gesagt, soll da hin geschrieben werden. Also fehlt das IST GLEICH. *U* durch *I* ist gleich? [...] Bei einer Gleichung können die Seiten, weil sie gleich groß sind, gleichen Inhalt haben, ausgetauscht werden. Damit ist Rechts noch nicht Links, aber beide Seiten gleich.“ (EPR5, 38-45)

Formel \ Kategorie	Klassifiz.	Sprache	Vorteile	Merkhilfe	Analogie	Exp.-Theo.	Gültigk.b.	Anw.b.
$I \sim U$	8/10	0/10	4/10	0/10	0/10	2/10	9/10	0/10
$R = \frac{U}{I}$	10/10	8/10	7/10	4/10	4/10	5/10	2/10	2/10
$R = \varrho \cdot \frac{l}{A}$	8/10	1/10	9/10	0/10	0/10	3/10	5/10	7/10
tritt auf bei	10/10	8/10	9/10	4/10	4/10	9/10	10/10	7/10

Tabelle 12.2.: Anzahl der LehrerInnen, bei denen die jeweilige Kategorie in der Stichprobe auftritt (genaue Aufstellung im Anhang in Tabellen D.4, D.5 und D.6)

12.3.1. Wichtigkeit oder Vorteile der Formel

Die Kategorie *Wichtigkeit oder Vorteile der Formel* umfasst Aussagen, bei denen LehrerInnen etwas dazu sagen, warum es sinnvoll oder hilfreich ist, eine Formel zu kennen oder zu benutzen. Die Kategorie tritt bei allen drei in der Erhebung berücksichtigten Formeln und bei 9 von 10 hospitierten LehrerInnen auf.

Bei allen drei Formeln konnten vier unterschiedliche inhaltliche Ausprägungen der Kategorie identifiziert werden, die im Folgenden näher beschrieben werden sollen:

- Formeln muss man sich **merken**.
- Formeln sind (inhaltlich) **wichtig**.
- Formeln sind wichtig für die **Prüfung** (einfacher Weg, Punkte zu bekommen).
- Mit Formeln kann ich etwas **machen** (etwas berechnen).
- Formeln sind **genau**.

Die ersten drei Punkte werden im hospitierten Unterricht wesentlich häufiger von LehrerInnen angesprochen als die letzten beiden. Diese Häufigkeiten spiegeln sich auch in der Anzahl der LehrerInnen wider, bei denen diese Ausprägung gefunden wurden (merken: 6/10, wichtig: 7/10, machen: 5/10). Nur 3 der an der Erhebung beteiligten LehrerInnen sprechen über den Aspekt der Genauigkeit, 4 sprachen an, dass man mit Formeln etwas machen könne (s. Tab. D.7 im Anhang). Diese Fokussierung auf Aspekte der Wichtigkeit für Prüfungen und den Unterricht selbst deutet an, dass

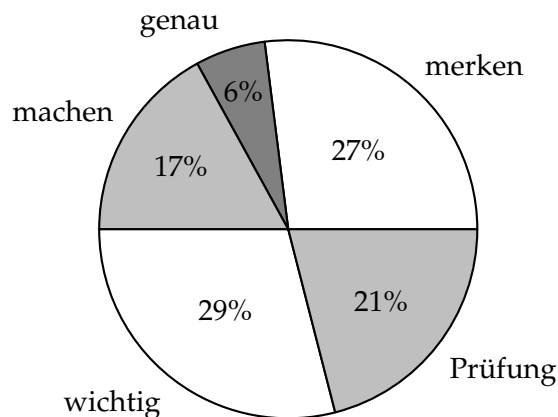


Abbildung 12.28.: Anteile Codings mit entsprechenden inhaltlichen Ausprägungen an der Kategorie *Wichtigkeit oder Vorteile einer Formel* ($N_{ges} = 49$)

die Relevanz von Formeln vorrangig unterrichtsimmanent gesehen und auch als solches kommuniziert wird. Seltener wird reflektiert, warum Formeln für die Physik selbst oder einzelne SchülerInnen wichtig sind. Im Folgenden sollen die identifizierten inhaltlichen Ausprägungen näher beschrieben werden.

Formeln muss man sich merken: Der erste Punkt ist die ausschließlich auf den Unterricht bezogene Aussage, dass SchülerInnen sich Formeln merken müssen. Dies wird nicht weiter begründet oder hinterfragt. Sobald eine Formel eingeführt wurde, müssen SchülerInnen diese auswendig lernen und dann wissen: „Das ist eine Formel, die muss man eigentlich wissen.“ (AWR6, 12) Diese Forderung macht in Verbindung mit der Theorie durchaus Sinn, betrachtet man die Funktion der kognitiven Entlastung durch die Mathematik: Formeln kann man sich leicht merken, sie fassen auf wenig Raum viele Inhalte zusammen. Gleichzeitig müssen nicht immer alle Inhalte mitgedacht werden, wenn eine Formel benutzt wird (s. Kap. 2.1.2). Diese Funktion von Formeln und die Vorteile, die darin liegen, sich eine Formel zu merken, werden aber von den LehrerInnen hier nicht explizit erklärt.

Formeln sind (inhaltlich) wichtig: Der zweite Punkt fasst viele Aussagen zusammen, bei denen implizit oder explizit die Wichtigkeit von Formeln betont wird. Implizit passiert dies besonders oft, indem Formeln als das Ergebnis im Tafelbild und damit auch in den Mitschriften der SchülerInnen besonders hervorgehoben werden (Zitat (1)). Damit werden sie als das Wichtigste auf der Tafel gewertet. Seltener wird eine Formel in Kombination mit der optischen Hervorhebung auch explizit als wichtig bezeichnet (Zitat (2)) oder das, was sie inhaltlich ausdrückt, wird als wichtig oder bedeutend gewertet (Zitat (3)). In einigen Fällen wird auch einfach nur gesagt, dass

eine Formel „gebraucht“ wird (Zitat (4)). Damit wird ausgedrückt, dass eine Formel zur Physik dazu gehört und ihre Wichtigkeit implizit beschrieben.

- (1) „Das ist die Gleichung. Diese bitte übernehmen. (...) Bitte auch rot oder farbig hervorheben.“ (HBG5, 17)
- (2) „Das ist wichtig, da können wir uns (...) einen Kasten drum rum machen.“ (SSG8, 53)
- (3) „Der Quotient U durch I hat in der Physik eine GANZ GANZ große Bedeutung.“ (AWR4, 54)
- (4) „Wir brauchen irgendwie eine Formel.“ (BTR6, 258)

Formeln sind wichtig für die Prüfung: Diese inhaltliche Ausprägung der Kategorie expliziert die Aussage der Wichtigkeit einer Formel noch etwas genauer und präzisiert den Bereich, für den sie wichtig sind, auf Prüfungen oder das Erhalten von Punkten in einer Prüfung. Diese Aussagen können sich entweder auf das reine Auswendiglernen und Notieren der Formel beziehen (Zitat (1) und (2)) oder auch das Rechnen mit der Formel mit einbeziehen (Zitat (3) und (4)).

- (1) „Ist eine Lernsache, Leute. Wenn ich jetzt von allen eingesammelt hätte/ Das Ohmsche Gesetz ist eine Lernsache. Wem die Physik schwerfällt, der kann sich mit diesen Lernsachen Punkte holen.“ (AWR4, 7)
- (2) „Und das ist auch morgen wichtig in der Arbeit, immer erst mal die Grundformeln aufschreiben. Dadrauf gibt es schon BEs oder Punkte. Bewertungseinheiten. Das ist in der Prüfung genauso, auf die GRUNDFORMEL gibt es IMMER Punkte. Also selbst, wenn man jetzt nicht weiß, wie man die umstellen soll, wie man damit rechnen soll. Immer erstmal die Grundformel hinschreiben, damit habt ihr schon erst mal die ersten Punkten [sic] sicher. (...) Ganz schnell, klar. Geht ja flink.“ (ABG6, 7)
- (3) „Solche Rechenaufgaben sind immer für DIE normalerweise eine Hilfe, die es nicht so mit dem Erklären haben. Wenn ich wenigstens die Formeln beherrsche und die Zahlen einsetze. Den Rest macht der Taschenrechner. Dann habe ich ein paar Punkte für das BERECHNEN von bestimmten Größen. Auch wenn ich nicht gut erklären kann. Mindestens DAS muss klappen in der Arbeit.“ (BTR4, 188)
- (4) „Und der Quotient U durch I ist auszurechnen in der Tabelle. (6 s) Mehr nicht. Und Thea, weiß jetzt, die muss nichts kapieren. U durch I kann man

mit dem Rechner ausrechnen und die Zahlenpaare übertragen, das ist ein Mechanismus.“ (EPR2, 22)

Mit Formeln kann ich etwas machen: In einigen Aussagen beschreiben LehrerInnen, was man mit Formeln machen kann. Diese Aussagen sind eine weitere Variante, die Wichtigkeit und Bedeutung von Formeln für die Physik und den Physikunterricht implizit hervorzuheben. In den allermeisten Fällen ist das, was man mit der Formel machen kann, etwas zu berechnen. In Zitat (1) wird diese Möglichkeit der Berechnung noch ergänzt durch die Aussage, dass die Formel schön, einfach und klein sei. Dies beschreibt somit zusätzlich die Eigenschaften der kognitiven Entlastung durch die Zusammenfassung vieler Inhalte auf kleinem Raum (s. auch die Betrachtungen zu Funktionen von Formeln in Kap. 2.1.2). In Zitat (2) wird diese Möglichkeit der Berechnung noch etwas genauer beschrieben, indem der Vorteil einer Berechnung gegenüber der experimentellen Ermittlung von Werten beschrieben wird. Zitat (3) wiederum sieht neben dem rein aus der Physik heraus stammenden Interesse daran, einen bestimmten Wert für eine Größe zu kennen, auch den praktischen Nutzen daran, einen Widerstandswert aus den Eigenschaften eines Drahtes zu ermitteln, ohne eine Spannung anschließen zu müssen. Diese inhaltliche Ausprägung der Kategorie ist eng verwandt mit der Unterkategorie *Formel zur Berechnung* unter *Erkenntnistheoretische Klassifizierung einer Formel*, die in Kapitel 12.3.4 näher beschrieben wird. Hier liegt jedoch der Fokus deutlicher auf der Tätigkeit, also dem Rechnen selbst, während bei der erkenntnistheoretischen Klassifizierung die Codierungen meist wesentlich kürzer sind und die Funktion lediglich benennen. Einige Aussagen, wie beispielsweise Zitat (1), werden beiden Kategorien zugeordnet.

(1) „Jetzt müssen wir das ganze nur noch in eine SCHÖNE, einfache, kleine Formel packen, womit wir jetzt den Widerstand immer GUT berechnen können.“ (HBG3, 129)

(2) „Und JETZT haben wir eine Formel, brauchen wir gar kein Experiment durchführen, sondern wir müssen nur wissen: Wie lang ist der Draht? Aus welchem Material ist der? Und wie groß ist der Querschnitt? Und können auch den Widerstand bestimmen. Richtig? Also wir haben eine zweite Möglichkeit, den Widerstand eines Leiters zu bestimmen. Wir müssen nicht unbedingt ein Experiment machen, Spannung und Stromstärke raussuchen, sondern es geht also auch auf DIESEM Weg.“ (BTR6, 336)

(3) „Wenn ich den Widerstand also WEISZ von so einem Leiter, dann kann ich die Stromstärke und Spannung dementsprechend regeln. [...] DAS hilft

mir aber, irgendwie den Stromkreis SO zu organisieren, dass da nichts passiert.“ (LRR10, 194)

Formeln sind genau: Der letzte Punkt bezieht sich auf wenige Aussagen zu dem Vorteil von Formeln, dass sie genauer sind als andere Aussagen. Dies bezieht sich somit auf den Aspekt der Exaktheit, den die Mathematik für die Physik ermöglicht (s. die theoretischen Betrachtungen zu Funktionen der Mathematik in der Physik in Kap. 2.1.2). In den gefundenen Aussagen wird zum einen betont, dass eine Formel exakter sei als die Beschreibung mit anderen Worten (Zitat (1)) oder dass in der Physik Dinge möglichst genau beschrieben werden sollen. Mit diesen Worten leitet der Lehrer in der entsprechenden Unterrichtspassage die Einführung der Formel für das Widerstandsgesetz ein.

(1) „Es ist eine Gesetzmäßigkeit, die ich nicht mit so ein paar Worten abtun kann. Wie lautet EXAKT das Ohmsche Gesetz?“ (BTR2, 52)

(2) „Na gut, jetzt wisst ihr aus der Erfahrung, der (6 s) Physiker ist immer bestrebt, alles ziemlich genau zu beschreiben“ (KPR7, 86)

Alle inhaltlichen Ausprägungen der Kategorie können bei mindestens zwei der betrachteten Formeln identifiziert werden, es zeigen sich keine inhaltlichen Ausprägungen, die bei einer Formel wesentlich häufiger vorkommen als bei anderen. Daher sind in dieser Stichprobe keine Unterschiede zwischen den Formeln auszumachen. Da insgesamt nur sehr wenige Codierungen in diese Kategorie fallen, könnte es möglich sein, bei einer größeren Stichprobe Unterschiede zwischen verschiedenen Formeln zu erkennen.

12.3.2. Gültigkeitsbedingungen

In einigen Aussagen beschreiben LehrerInnen Gültigkeitsbedingungen für Formeln. Häufig wird dies explizit formuliert, indem eine Rahmenbedingung als Gültigkeitsbedingung formuliert und manchmal auch bei der Erarbeitung einer Formel an der Tafel schriftlich festgehalten wird. Diese werden dann auch bei mündlichen Wiederholungen abgefragt. In anderen Fällen verstecken sich die Gültigkeitsbedingungen implizit in Aussagen, beispielsweise in der Formulierung „Für X gilt...“, wobei X dann eine Gültigkeitsbedingung darstellt, oder indem Ergebnisse einer Rechnung noch einmal kritisch hinterfragt und relativiert werden.

Die meisten der hier zusammengefassten Codierungen fallen auf das Ohmsche Gesetz (s. Diagramm 12.27). Da die Gültigkeitsbedingungen für die drei betrachteten Formeln unterschiedlich sind, werden diese im Folgenden einzeln betrachtet.

Für die **Definitionsformel** $R = \frac{U}{I}$ werden in der gesamten Erhebung nur zwei implizite Aussagen gemacht, die sich auf Gültigkeitsbedingungen beziehen. Die erste relativiert das Ergebnis einer Berechnung (Zitat (1)). Das zweite Coding (Zitat (2)) ist als Grenzfall zwischen Ohmschen Gesetz und der Definitionsformel zu betrachten. Es bezieht sich im Grunde auf die Gültigkeit der direkten Proportionalität zwischen I und U . Diese wird aber nun auf den Widerstand bezogen, indem auf Nachfrage einer Schülerin gesagt wird, dass der Widerstand R nur dann eine konstante Größe ist, wenn die Temperatur konstant bleibt. Im Grunde ist dies keine wirkliche Gültigkeitsbedingung, da die Formel $R = \frac{U}{I}$ auch bei veränderlicher Temperatur ihre Gültigkeit behält. Da die Aussage dennoch eine wichtige Information *über* die Formel und die Art des Ergebnisses, das ich erhalte, darstellt, wird auch diese Aussage hier gezählt. Gültigkeitsbedingungen könnten hier expliziter formuliert werden, indem dies als Abgrenzung zum Ohmschen Gesetz thematisiert würde. Dieser Fall kann in der betrachteten Stichprobe nicht identifiziert werden.

(1) Herr Jasper: „Gut, jetzt müssen wir der Ehrlichkeit halber sagen, ganz so ist es nicht. Weil wir rechnen hier mit Gleichspannung, dort wird mit Wechselspannung gearbeitet. Da ist es nicht ganz so EXTREM, die Verluste.“ (ABG6, 54)

(2) Sophie: „Sie haben ja gesagt, dass dann, wenn (unv.) dann also steigt, dass dann auch der Widerstand größer wird. Aber wir haben ja jetzt in unserer Rechnung nie die Temperatur mit einbezogen. Wie können wir da herausfinden, ob der Widerstand größer wird? Ich mein, wir haben ja eigentlich immer die/“

Herr Schmitt: „Ist richtig. Wir haben bei unseren Rechnungen das nicht einbezogen. UNSERE Widerstände haben die Temperatur gehalten. Das hätte man wie / das hätte man gemerkt, wenn man einfach mal drauf gefasst hätte, hätte man das gemerkt, dass die die Temperatur halten. ABER prinzipiell müssten wir wirklich immer die Temperatur mit einbeziehen. Weil der Widerstand ist eine temperaturabhängige Größe. Also diese/ ja, es ist schon richtig. Wir haben da irgendwo nicht korrekt gehandelt, in dem Sinne. Ist schon / ist schon richtig.“ (SSG5, 153-154)

Auch für das **Widerstandsgesetz** finden sich Formulierungen, die sich auf die Gültigkeitsbedingung der Temperaturkonstanz beziehen. Dies wird in der Regel in Verbindung mit den Werten für den spezifischen elektrischen Widerstand ϱ besprochen, der tabellarisch für eine bestimmte Temperatur im Tafelwerk aufgelistet ist. Durch die

Temperaturabhängigkeit dieses Wertes ist somit der berechnete Wert des Widerstandes R des Drahtes nur für die angegebene Temperatur gültig (Zitat (3)). Eine weitere Möglichkeit, eine Gültigkeitsbedingung für das Widerstandsgesetz zu formulieren, ist die implizite Formulierung, dass die gefundenen Zusammenhänge für einen metallischen Draht gelten (Zitat (4)). Hier wird implizit als Gültigkeitsbedingung ein metallisches Material vorausgesetzt. Außerdem wird das Widerstandsgesetz auf einen langen Draht bezogen, nicht auf das bloße Material metallische Leiter (wie es beim Ohmschen Gesetz der Fall ist).

(3) Herr Schmitt: „Spezifischer elektrischer Widerstand bei 20 Grad Celsius. (...) Wir haben ja gesagt, die Temperatur möchte doch irgendwo ein bisschen konstant sein.“ (SSG9, 57)

(4) „Der Widerstand eines metallischen Drahtes ist abhängig von der Länge des Leiters, von der Querschnittsfläche, vom Stoff, aus dem der Leiter besteht.“ (AWR5, AB)

Die meisten Formulierungen, die Gültigkeitsbedingungen einer Formel beschreiben, beziehen sich auf das **Ohmsche Gesetz** (etwa 80% der Codierungen in dieser Kategorie). Die meisten Codierungen für das Ohmsche Gesetz betreffen die Gültigkeitsbedingung der Temperaturkonstanz, die hier auch in der Regel explizit formuliert wird. Diese Gültigkeitsbedingung wird positiv (Zitat (5)) und auch negativ (Zitat (6)) formuliert. Die Grenzen der Gültigkeit werden meistens an einer Glühlampe untersucht und dann auch konkret auf diese bezogen (Zitat (7)). Außerdem finden sich Aussagen, die die Gültigkeit des Ohmschen Gesetzes explizit oder auch implizit auf metallische Leiter beziehen (Zitat (8)). Beide Gültigkeitsbedingungen werden häufig auch im Tafelbild vermerkt, wie Abbildung 12.29 zeigt.

(5) „Die Bedingung für das Ohmsche Gesetz: die Temperatur des Leiters bleibt konstant.“ (SBG7, 86)

(6) „Die Temperatur erhöht sich ja, das heißt, die Temperatur bleibt nicht konstant und dann gilt das Ohmsche Gesetz nicht mehr.“ (BTR1, 89)

(7) „Also, Ergebnis: Für eine Glühlampe gilt das Ohmsche Gesetz NICHT. (...) Und die Begründung: Die Temperatur bleibt bei ihr NICHT konstant.“ (KTH2, 142)

Vergleich der LehrerInnen: Fast alle LehrerInnen sprechen im hospitierten Unterricht Gültigkeitsbedingungen an (9/10, s. Diagramme D.18 im Anhang). Bei allen LehrerInnen sind es verhältnismäßig wenige Codierungen, die in diese Kategorie fallen (2 -

Merke: Für alle metallischen Leiter gilt unter der Bedingung, dass die Temperatur (n_g) konstant bleibt:

$$I \sim U$$

Abbildung 12.29.: Ausschnitt der Abschrift eines Tafelbilds zum Ohmschen Gesetz (EPR4, TB)

7 Codierungen, durchschnittlich 4 Codierungen). Die meisten Codierungen weist Frau Müller auf, Herr Lenz spricht als einziger bei keiner Formel über Gültigkeitsbedingungen. Die Häufigkeitsverteilung auf die Formeln spiegelt sich auch auf Ebene der einzelnen LehrerInnen wider. Während nur 2 LehrerInnen bei der Definitionsformel über Gültigkeitsbedingungen sprechen, sind es für das Widerstandsgesetz die Hälfte der beobachteten LehrerInnen und beim Ohmschen Gesetz nahezu alle (9/10) (s. Tab. D.5, D.6 und D.4 im Anhang).

Zusammenfassend lässt sich also sagen, dass für alle drei Formeln die Bedingung der Temperaturkonstanz diskutiert wird. Dies spielt insbesondere beim Ohmschen Gesetz eine sehr wichtige Rolle. Außerdem wird beim Widerstandsgesetz und beim Ohmschen Gesetz angesprochen, dass beide Zusammenhänge für metallische Leiter gelten. Für die Definitionsformel werden extrem wenige Aussagen zu Gültigkeitsbedingungen gemacht. Dies kann auch darauf zurückgeführt werden, dass die Formel $R = \frac{U}{I}$ als Definition des Widerstandes allgemeingültig ist und damit so gut wie keine Gültigkeitsbedingungen hat, während die anderen beiden Formeln Gesetzmäßigkeiten sind, die aus empirischen Ergebnissen abgeleitet werden und nur unter bestimmten Rahmenbedingungen gültig sind. Auch wenn die beobachteten LehrerInnen diesen Unterschied im Unterricht nicht explizit ansprechen, spiegelt sich dies in der Art und Weise wider, wie LehrerInnen mit Gültigkeitsbedingungen im Unterricht umgehen und welchen Stellenwert diese einnehmen.

12.3.3. Anwendungsbereich der Formel

Die Kategorie Anwendungsbereich umfasst Äußerungen, bei denen beschrieben wird, für welche Anwendungsbereiche eine Formel genutzt werden kann. Dies geschieht häufig in Abgrenzung zum Anwendungsbereich anderer Formeln. Außerdem werden hier Aussagen zusammengefasst, bei denen explizit eine Theorie benannt wird, in die eine Formel eingebettet ist. In Anlehnung an die Theorie der semantischen Netzwerke (s. Kap. 3.3.2 zur Bedeutung von Formeln), ist die umgebende Theorie sehr wichtig, um eine Formelbedeutung zu konstruieren. Die Benennung der Theorie kann SchülerInnen somit eventuell helfen, die benötigten Wissensressourcen zu reaktivieren und sie mit

der Formel zu verknüpfen.

Während für das Ohmsche Gesetz gar keine Codierungen in diese Kategorie eingeordnet werden konnten und für die Definitionsformel nur 2, fällt der Großteil der Codierungen auf das Widerstandsgesetz (s. Diagramm 12.27).

Die Kategorie tritt bei 8 der 10 hospitierten LehrerInnen auf, auch hier haben die meisten LehrerInnen nur sehr wenige Codierungen (1-5), sodass die Kategorie zwar eine gewisse Rolle bei den meisten LehrerInnen spielt, diese aber eine eher untergeordnete Rolle im Unterricht spielt.

Die zwei Aussagen zur **Definitionsformel** $R = \frac{U}{I}$ benennen die einbettende Theorie als die Elektrizitätslehre. Bei der zweiten Äußerung geht es insbesondere um die Definition des Widerstandes als physikalische Größe in Abgrenzung an eine Alltagsbedeutung des Begriffes (Zitat (2)).

(1) Herr Lenz: „Der Widerstand (24 s) ist die Spannung durch die Stromstärke. Das ist eine der WICHTIGSTEN Gleichungen, die wir in der Elektrizitätslehre haben.“ (HBG1, 27)

(2) Herr Jasper: „Wenn wir in der PHYSIK von Widerstand sprechen, in der Elektrizitätslehre von Widerstand sprechen, was wird DORT wohl aufgehalten werden höchst wahrscheinlich?“ (ABG5, 26)

Für das **Widerstandsgesetz** gibt es zum einen ebenfalls Äußerungen, die die Theorie benennen oder zumindest beschreiben, dass die umgebende Theorie relevant für das Verständnis und richtige Anwenden der Formel ist. Dies ergibt sich in allen gefundenen Codierungen aus der Doppelbelegung des Formelzeichens ρ für die Dichte, wenn es darum geht, die Masse eines Körpers als eine Eigenschaft zu bestimmen, und als spezifischen Widerstand, wenn es darum geht, den elektrischen Widerstand eines Leiters zu ermitteln (Zitat (1)).

Für die Anwendungen werden verschiedene Szenarien beschrieben. Häufig wird beschrieben, wann das Widerstandsgesetz, oft auch in Abgrenzung zur Formel $R = \frac{U}{I}$, genutzt werden muss oder kann. Diese Anwendungen beschreiben:

- eine Unterscheidung von experimentellen Szenarien, bei denen U und I gemessen werden, und theoretischen Betrachtungen, bei denen die bekannten Eigenschaften des Drahtes genutzt werden (Zitat (2))
- die Formel als Hilfe, um einen experimentellen Aufbau mit konkreter Dimensionierung zu planen (Zitat (3))
- einen Aufgabentypen als konkrete Anwendung der Formel (Zitat (4))

(1) Herr Jasper: „Und hier müssen wir also aufpassen. Hier ist NICHT die Dichte gemeint von dem Stoff, die hat hier nichts zu suchen, sondern wenn wir bei der Elektrik das Formelzeichen Klein-Rho sehen, ist in dem Falle gemeint, wir brauchen das Widerstandsgesetz oder im Zusammenhang mit dem Widerstandsgesetz der sogenannte SPEZIFISCHE ELEKTRISCHE WIDERSTAND des Materials.“ (ABG5, 88)

(2) Herr Schmitt: „Genau, es kommt halt darauf an, was haben wir gegeben. Experimentell würde man eher U durch I nehmen, in theoretischen Betrachtungen nehmen wir lieber das Widerstandsgesetz.“ (SSG8, 155)

(3) Frau Carle: „Wofür brauchen wir das Ganze alles wieder. (unverständlich) Wäre natürlich interessant auch mal, so einen Widerstand auszurechnen. [...] Ich kriege den Widerstand eines Drahtes raus, ohne dass ich Spannung und Stromstärke habe. DAS hilft mir aber, irgendwie den Stromkreis SO zu organisieren, dass da nichts passiert.“ (LRR10, 194)

(4) Herr Lenz: „UND wo diese Kurzschlüsse entstehen, die sind manchmal an versteckten Stellen unter der Erde und dann müssten wir das Widerstandsgesetz nehmen“ (HBG4, 35)

In dieser Erhebung verknüpfen LehrerInnen nur sehr selten eine Formel explizit mit der sie umgebenden physikalischen Theorie. Beim Widerstandsgesetz wurde dies durch die Doppelbelegung des Formelzeichens ρ motiviert. Eventuell kann die seltene Benennung der Theorien im Unterrichtskontext aber auch darauf zurückgeführt werden, dass immer nur themenimmanent unterrichtet wird. Da sich die hospitierte Unterrichtseinheit ausschließlich mit der Elektrizitätslehre befasst, ist es in der Regel nicht nötig, diesen thematischen Rahmen noch einmal zu benennen oder näher zu beschreiben. Eventuell wird dies eher in zusammenfassenden Stunden gemacht, oder wenn aus einem anderen Themengebiet heraus auf eine Formel verwiesen wird. Da jedoch nur der entsprechende Themenbereich hospitiert wurde, können solche Verweise in dieser Erhebung nicht nachgewiesen werden. Daher kann aus den hier beobachteten Lehreräußerungen nicht ausgeschlossen werden, dass an anderer Stelle im Unterricht eine Formel auch explizit in eine Theorie eingebettet wird.

Für das Widerstandsgesetz werden verhältnismäßig viele Codierungen für den Anwendungsbereich der Formel gefunden. Dies liegt insbesondere an der Verwendung der zwei unterschiedlichen Formeln für den Widerstand R . Diese zwei unterschied-

lichen Formeln führen auch dazu, dass SchülerInnen verunsichert scheinen, welche Formel sie nutzen sollen, was sich beispielsweise an der folgenden Frage zeigt:

Tammo: „Aber die Formel für den Widerstand ist doch (unv.)“

Herr Lenz: „Ja (...), R ist gleich U durch I , das ist das OHMSCHE Gesetz und dieses Gesetz nennen wir (...) eben das (11 s) Wenn du eine Frage hast, wie gehen wir vor?“

Maja: „Was berechnet man da jetzt anders? (5 s)“

Herr Lenz: „Ich würde die Frage mal kurz weiter geben, die von vorne kam. Was ist denn jetzt anders an R ist gleich U durch I ? Warum brauchen wir zwei verschiedene Formeln?“ (HBG3, 130-133)

Es zeichnet sich somit ab, dass die Kategorie *Anwendungsbereich einer Formel* im Unterricht insbesondere dann thematisiert wird, wenn Doppelbelegungen (von Formelzeichen oder Formeln für bestimmte Größen) auftauchen und somit die Frage motivieren, wann welche Formel oder welche Formelzeichenbedeutung Gültigkeit hat.

12.3.4. Erkenntnistheoretische Klassifizierung der Formel

Sehr oft werden im beobachteten Unterricht explizit oder implizit Formeln auf die Art ihrer Aussage hin klassifiziert. Dies geschieht für alle drei in der Erhebung relevanten Formeln (vgl. Diagramm 12.27).

Die drei in der Erhebung betrachteten Formeln werden als Formeln zur Berechnung, Formeln zur Definition einer Größe oder empirische Gesetze klassifiziert. Außerdem werden sie als Verallgemeinerung oder Kurzform bezeichnet. In einigen Fällen bezeichneten LehrerInnen Formeln auch einfach als formal gegeben. Die Häufigkeitsverteilungen der Unterkategorien sehen für die drei betrachteten Formeln jeweils unterschiedlich aus (s. Diagramm 12.30). Die drei Formeln scheinen somit von den hospitierten LehrerInnen als unterschiedlich in der Art ihrer Aussage wahrgenommen zu werden. Während sowohl beim Widerstandsgesetz als auch bei der Definitionsformel die Unterkategorie *Formel zur Berechnung* besonders häufig auftritt, hat diese für das Ohmsche Gesetz keinerlei Relevanz. Die Unterkategorie *Formel als empirisches Gesetz* tritt insbesondere für das Ohmsche Gesetz und das Widerstandsgesetz auf, *Formel zur Definition* taucht lediglich für die Definitionsformel $R = \frac{U}{I}$ auf. Hingegen werden alle drei Formeln oft als *Kurzform* bezeichnet.

Vergleich der LehrerInnen: Die Kategorie *Erkenntnistheoretische Klassifizierung der Formel* kommt bei allen 10 an der Erhebung beteiligten LehrerInnen vor. Sie ist bei

allen LehrerInnen die häufigste Kategorie in der Oberkategorie *Über Formel wird gesprochen*. Es zeigen sich jedoch deutliche Unterschiede in der absoluten Häufigkeit der codierten Textstellen. Auf der einen Seite gibt es eine Gruppe von 5 LehrerInnen mit vielen Codierungen in dieser Kategorie (21 bis max. 41), wobei Frau Müller mit 41 Codierungen die meisten Codierungen in dieser Kategorie aufweist. Die anderen 5 LehrerInnen zählen eher wenige Codierungen in dieser Kategorie (6 bis max. 12).

Im Folgenden sollen die induktiv gebildeten Unterkategorien einzeln beschrieben werden.

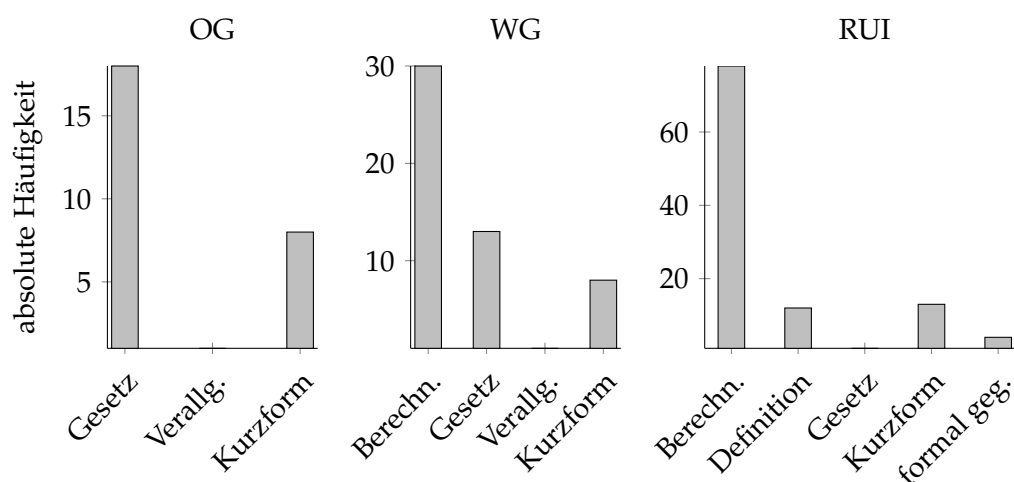


Abbildung 12.30.: Codehäufigkeiten Unterkategorien *Klassifizierung der Formel*
Für bessere Lesbarkeit haben y-Achsen unterschiedliche Maximalwerte. Es werden nur Kategorien aufgetragen, die für jeweilige Formel vorkommen. Nicht dargestellte Balken haben Wert 1.

Formel zur Berechnung

Die in der Erhebung mit Abstand am häufigsten vorkommende Klassifizierung einer Formel ist die Bezeichnung einer Formel als Berechnungsformel. Dies setzt den Fokus deutlich auf einen Werkzeugcharakter, bei dem bekannte Größen in eine Formel „hineingesteckt“ werden, um eine unbekannte Größe zu erhalten. Diese Unterkategorie ist eng verwandt mit der Kategorie *Wichtigkeit oder Vorteile einer Formel*, die auch die inhaltliche Ausprägung enthält, dass mit Formeln etwas gemacht oder explizit gerechnet werden kann (s. Kap. 12.3.1). Der Fokus liegt hier jedoch weniger auf der Tätigkeit des Rechnens selbst, sondern mehr auf einer Benennung der Funktion einer Berechnung.

Diese Klassifizierung geschieht zum einen explizit, indem eine Formel als „Formel zur Berechnung“ oder „Berechnungsgleichung“ benannt wird (Zitat (1)). In ähnlichen

Fällen wird bei der Einführung der Formel im Tafelbild vor die Formel selbst „Berechnung“ geschrieben. Damit wird die Formel allein auf ihre Funktion zur Berechnung unbekannter Größen reduziert. Andere Aspekte treten deutlich in den Hintergrund (s. Abb. 12.31).

In anderen Fällen ist die Interpretation des Aussagecharakters einer Formel eher implizit enthalten, indem formuliert wird, dass eine Größe mit Hilfe einer Formel ausgerechnet werden kann (Zitat (2)), oder auch die Formel selbst gesprochen wird, als Möglichkeit, eine Größe zu berechnen (Zitat (3)). Die dritte ebenfalls implizite Variante, mit der eine Formel indirekt erkenntnistheoretisch als Formel zur Berechnung interpretiert wird, ist die Betonung, dass eine Formel für eine Berechnung gebraucht wird. Dies geschieht oft im Kontext konkreter Rechenaufgaben, wenn beispielsweise das allgemeine Vorgehen noch einmal von der Lehrkraft wiederholt wird (Zitat (4)). Hierbei wird ganz selbstverständlich die Lösung einer Rechenaufgabe mit einer Formel verknüpft.

(1) Herr Meyer: „Die BERECHNUNGSGLEICHUNG für den Widerstand lautet: R ist gleich U durch I !“ (EPR8, 26)

(2) Frau Müller: „Das ist ja nur eine Formel, um den Widerstand zu berechnen. R ist Rho mal l durch A .“ (BTR7, 59)

(3) Herr Schmitt: „Wir BERECHNEN den Widerstand, indem wir die Spannung durch die Stromstärke teilen.“ (SSG3, 59)

(4) Frau Berger: „Jetzt kommen wir zu behin/ zur Berechnung. Ihr schreibt bitte. Los gehts. Formel.“ (AWR4, 139)

Berechnung: elektrischer Widerstand = $\frac{\text{Spannung am Bauelement}}{\text{Stromstärke im Bauelement}}$

$$R = \frac{U}{I}$$

Abbildung 12.31.: Ausschnitt aus der Abschrift eines Tafelbilds zum Elektrischen Widerstand (LRR5, TB)

Diese Kategorie tritt nur für die Definitionsformel und das Widerstandsgesetz auf (vgl. Diagramm 12.30). Das Ohmsche Gesetz $I \sim U$ nimmt somit eine Sonderrolle ein. Dies ist darauf zurückzuführen, dass es zwar in dieser Untersuchung als algebraischer Ausdruck und damit als Formel gezählt wird, jedoch keine Gleichung ist (s. Kap. 3.3.1 zum Begriff Formel). Aus diesem Grund eignet sich das Ohmsche Gesetz auch nur

bedingt, um Werte im klassischen Sinne auszurechnen. Wie die Kategorie *Rechnung* zeigt, werden zwar mit Hilfe von Proportionalitäten und auch mit Hilfe des Ohmschen Gesetzes ebenfalls unbekannte Werte ermittelt, dies hat jedoch nicht den Charakter einer typischen gegeben-gesucht-Lösung-Aufgabe. Das Ohmsche Gesetz wird somit von LehrerInnen in dieser Erhebung nicht als Formel oder Ausdruck zur Berechnung eines unbekannten Wertes im Unterricht dargestellt.

Bei allen 10 LehrerInnen ist die Klassifizierung als Formel zur Berechnung die häufigste erkenntnistheoretische Klassifizierung (s. Diagramme D.20 im Anhang). Dies deutet auf eine große Relevanz für den Unterricht hin und ist als Indiz für einen eher technisch orientierten Blick auf Formeln im Unterricht zu werten (s. auch Kap. 15).

Formel als empirisches Gesetz

Formeln werden in der Physik und im Unterricht oft aus experimentellen Messwerten abgeleitet (s. auch Klassifizierung von Formeln nach Krey und Karam (2016) in Kap. 3.3.2). Wird dieser Erkenntnisweg zur Formel von den LehrerInnen betont, dann gibt das SchülerInnen die Möglichkeit, etwas über Formeln im Allgemeinen und diese Formel im Speziellen zu lernen: Formeln fallen nicht vom Himmel oder stehen einfach im Buch, sie werden durch lange Erkenntnisprozesse entwickelt und durch experimentelle Settings geprüft. Diese Erkenntniswege werden von WissenschaftlerInnen vollzogen und sind damit auch in einem gewissen Rahmen subjektiven Einflüssen unterworfen.

Wird eine Formel über die Nennung ihres Namens („Ohmsches Gesetz“ / „Widerstandsgesetz“) hinaus explizit als Gesetz benannt, dann wird diese Formel als Gesetz klassifiziert (Zitat (1)). Bei einer zweiten Variante wird beschrieben, dass eine Formel aus Messwerten abgeleitet wurde. In diesem Fall erfolgt die Klassifizierung zwar nur implizit, erhält aber für SchülerInnen Informationen, die über die Bezeichnung „Gesetz“ hinausgehen (Zitat (2)). Im Fall des Ohmschen Gesetzes wird die „Entstehung des Gesetzes aus Messwerten“ manchmal auch mit Georg Simon Ohm verknüpft und erhält damit auch eine wissenschaftsgeschichtliche Perspektive (Zitat (3)).

(1) Herr Lenz: „Jetzt kommen wir zu einem zweiten Gesetz. Dem Widerstandsgesetz.“ (HBG3, 21)

(2) Herr Jasper: „WIE ist diese Formel jetzt zu lesen? Beziehungsweise wie ist sie jetzt aus unseren Messwerten entstanden?“ (ABG5, 90)

(3) Frau Berger: „Diesen Zusammenhang hat ein Physiker für mehrere Bauelemente untersucht, schriftlich formuliert. Und das ist in die Physik eingegangen als das sogenannte Ohmsche Gesetz. [...] Herr Ohm hat diesen

Teil mehrfach untersucht und hat dann ein Gesetz formuliert, das heute noch unter dem Begriff Ohmsches Gesetz verwendet wird.“ (AWR3, 44)

Diese Kategorie kommt vor allem für das Ohmsche Gesetz und das Widerstandsgesetz vor, für die Definitionsformel gibt es nur eine Codierung¹⁸. Dies ist insofern wenig überraschend, da diese zwei Formeln die Bezeichnung Gesetz direkt in ihrem Namen tragen.

Alle 10 LehrerInnen sprechen bei mindestens einer der drei Formeln die Klassifizierung als Gesetz an (s. Diagramme D.20 im Anhang). In Bezug auf die einzelnen Formeln sind es beim Ohmschen Gesetz und dem Widerstandsgesetz jeweils 7 von 10 LehrerInnen.

Formel als Verallgemeinerung

Die Unterkategorie *Formel als Verallgemeinerung* taucht nur bei einer Lehrerin (Frau Müller) auf. Da sie jedoch aus der Theorie heraus einen wichtigen Aspekt des Aussagecharakters von Formeln darstellt, wird dieser Unterkategorie dennoch eine gewisse Relevanz unterstellt. Diese Kategorie ist inhaltlich eng verknüpft mit der Funktion der Idealisierung, die die Mathematik in der Physik erfüllt (s. Kap. 2.1.2). Eine Idealisierung ist Teil einer Modellbildung und damit Verallgemeinerung mehrerer realer Fälle auf einen idealen Fall, der dann wiederum mathematisch beschrieben werden kann. Ob dieser Aspekt von Formeln im Unterricht tatsächlich von dieser einen Lehrerin abgesehen zum Tragen kommt, müsste in einer größeren Stichprobe untersucht werden.

Frau Müller nennt eine Formel als Verallgemeinerung konkreter Fälle für das Ohmsche Gesetz (Zitat (1)) und für das Widerstandsgesetz (Zitat (2)). Während beim Beispiel für das Ohmsche Gesetz betont wird, dass die Proportionalität eine Verallgemeinerung des konkreten Verhaltens zweier Größen ist, beschreibt das Zitat (2), wie man von einer konkreten Rechnung, die mit Hilfe der experimentell ermittelten Proportionalitäten durchgeführt wird, das Vorgehen hin zu einer Formel, beziehungsweise Rechenregel, verallgemeinert werden kann.

(1) Frau Müller: „Wer nur hingeschrieben hat, wenn sich das eine verdoppelt, verdoppelt sich das andere auch, das ist noch nicht korrekt. Weil wir da nicht wissen, was passiert, wenn man verdreifacht, vervierfacht, halbiert

¹⁸Bei dieser handelt es sich zudem um einen Grenzfall zwischen Ohmschen Gesetz und Definitionsformel, da hier die Formel $R = \frac{U}{I}$ als Ohmsches Gesetz bezeichnet wird: „Das Ohmsche Gesetz kommt auch dran: R ist gleich U durch I , also in Form der Formel: R ist gleich U durch I “ (AWR6, 159)

und und und. Deswegen sagt man, um allgemein zu sprechen also: Für einen metallischen Leiter gilt: Stromstärke und Spannung sind zueinander proportional.“ (BTR2, 60)

(2) Frau Müller: „Also wir haben jetzt rausgekriegt, wie groß der Widerstand dieses eintausend Meter langen Kupferdrahtes ist mit einem Querschnitt von zwei Quadratmillimetern. Über DREI Schritte. Und DAS kann man jetzt in eine Formel packen. [...] Wir haben zuerst geguckt, wie groß der spezifische Widerstand des Kupferdrahtes ist. [...] Jetzt verallgemeinern wir noch weiter. [...] Wenn die Länge beliebig ist, was müssen wir dann mit dem spezifischen Widerstand machen? [...] Wir haben den jetzt mit der Länge multipliziert. [...] Was haben wir im dritten Schritt gemacht? [...] Der Querschnitt hat sich verdoppelt, wir haben halbiert. [...] Und jetzt allgemein. WAS müssen wir also mit unserem Produkt machen? [...] Durch den Querschnitt rechnen. Genau. Jetzt müssen wir noch durch den Querschnitt dividieren. Perfekt. Und JETZT haben wir unsere Formel.“ (BTR6, 300-324)¹⁹

Formel als Kurzform

Eine Formel fasst auf wenig Raum viele Informationen zusammen. Bei der Beschreibung des Ebenenmodells für die Versprachlichung von Formeln (s. Kap. 5.4) wird in diesem Zusammenhang auch von einer hohen semantischen Dichte gesprochen. Die Kategorie *Formel als Kurzform* ist theoretisch mit den Funktionen der kognitiven Entlastung, der Kommunikation und der Idealisierung verknüpft (s. Kap. 2.1.2): Da eine Formel abstrakte Inhalte auf wenig Raum zusammenfasst, kann sie den Formelbenutzer kognitiv entlasten, da er oder sie den vollständigen Bedeutungsumfang nicht im Detail mitdenken muss. Dies wiederum erleichtert Kommunikation, da die präzisen Bedeutungen nicht explizit kommuniziert werden müssen, sondern von einem Konsens zwischen KommunikationsteilnehmerInnen bezüglich der gemeinten Bedeutung ausgegangen wird. Die Idealisierung wiederum spiegelt sich in der Formel wider, da diese viele konkrete Fälle modelliert und idealisiert und damit diese vielen Fälle in einem kurzen Ausdruck zusammenfasst.

In den codierten Textstellen äußert sich diese meist implizite Interpretation einer Formel als Kurzform mehrerer Inhalte auf zwei unterschiedliche Weisen. Zum einen wird der Vorteil der kürzeren Formel gegenüber verbalen Sätzen betont, da die Formel weniger Platz wegnimmt. In Zitat (1) wird dies noch durch die etwas flapsige Be-

¹⁹Der vollständige Ausschnitt aus dem Unterrichtstranskript ist im Anhang unter D.6.6 zu finden.

zeichnung des „faulen Physikers“ unterstützt. Zum anderen wird umgekehrt betont, dass SchülerInnen die Formel nur benutzen können, wenn sie wissen, wofür die Formelzeichen stehen (Zitat (2)). Auf letzterem Wege wird also darauf hingewiesen, dass diese Kurzform nur dann funktioniert, wenn der bestehende Bedeutungskonsens über die Abkürzung auch wirklich bekannt ist. In anderen Fällen wird nicht weiter über Vor- oder Nachteile gesprochen, sondern lediglich die Formel als Kurzform bezeichnet (Zitat (3)).

(1) Frau Müller: „Jetzt wissen wir, der Physiker an und für sich ist FAUL. Der würde ja niemals drei Worte schreiben, wenn er uns sagen will, wie man was berechnet. Sondern der arbeitet ja mit den Formelzeichen.“ (BTR2, 309)

(2) Herr Meyer: „Wir müssen wissen, was U ist. Wir müssen wissen, was groß I bedeutet.“ (EPR4, 67)

(3) Frau Carle: „Und jetzt haben wir das in mathematischer Kurzform.“ (LRR4, 71)

Die Kategorie *Formel als Kurzform* kommt für alle 3 in der Erhebung betrachteten Formeln vor und konnte bei 9 der 10 LehrerInnen mindestens einmal identifiziert werden (s. Diagramm 12.30, sowie Diagramme D.20 im Anhang).

Formel als formal gegeben

Wenn eine Formel weder hergeleitet, noch inhaltlich motiviert wird, dann kann sie als „formal gegeben“ bezeichnet werden. Das bedeutet, eine Formel wird als etwas dargestellt, das in der Physik selbstverständlich ist, ohne dass auf ihre Herkunft oder den Erkenntnisweg zu ihr hin näher eingegangen wird.

Diese Kategorie tritt nur bei einem Lehrer (Herrn Jasper) auf und wurde auch von ihm nur in Bezug auf eine Formel (die Definitionsformel $R = \frac{U}{I}$) genannt. Er sagt hierzu: „Jetzt lassen wir diese Formel einfach erst mal so im Raum stehen und sagen, die ist einfach gegeben.“ (ABG1, 37) über die Herkunft der Formel wird beschrieben, dass sie aus dem Buch bekannt sei: „Ganz formal, die aus dem Buch bekannte Gleichung Groß- R ist gleich U geteilt durch I “ (ABG1, 76). Die Funktion der Formel als Formalismus wird damit besonders in den Vordergrund gerückt. Ihre erkenntnistheoretische Bedeutung für die Physik oder den Physikunterricht, ihre Funktionen oder auch ihre inhaltliche Bedeutung treten in den Hintergrund. Um diese etwas drastische Interpretation zu relativieren, muss jedoch in Betracht gezogen werden, dass Herr Jasper in Bezug auf die Definitionsformel zwar auch sehr oft die Klassifizierung einer *Formel zur Berechnung*

nutzt, aber auch drei Unterrichtsstellen codierten wurden, in denen er die Formel als *Formel zur Definition* bezeichnet (s. Tab. D.8 im Anhang).

Zusammenfassung der Ergebnisse zur Kategorie *Erkenntnistheoretische Klassifizierung der Formel*

In der Erhebung spiegeln sich in den Aussagen der LehrerInnen gewisse erkenntnistheoretischen Unterschiede zwischen den einzelnen Formeln wider. Alle LehrerInnen in der Erhebung bezeichnen $R = \frac{U}{I}$ als Formel zur Berechnung, 7 der 10 LehrerInnen als Definitionsformel. Außerdem wird diese Formel von 6 LehrerInnen als Kurzform bezeichnet. Beim Widerstandsgesetz bezeichnen 8 LehrerInnen die Formel als Berechnungsformel, 7 als empirisches Gesetz und 4 als Kurzform. Das Ohmsche Gesetz wiederum wird von keinem der LehrerInnen als Berechnungsformel bezeichnet, dafür nennen auch hier 7 LehrerInnen die Klassifizierung als empirisches Gesetz und 5 bezeichnen die Formel als Kurzform (s. Tab. D.8, D.9 und D.10 im Anhang). Die Abbildung 12.32 verdeutlicht diese unterschiedlichen Verteilungen für die einzelnen Formeln. Besonders deutlich werden hier die unterschiedlichen Klassifizierungen als Definition (für $R = \frac{U}{I}$) oder als Gesetz (Ohmsches Gesetz und Widerstandsgesetz). Alle drei Formeln hingegen werden von vielen LehrerInnen als Kurzform bezeichnet.

Nur ein Lehrer (Herr Jasper) bezeichnet die Definitionsformel $R = \frac{U}{I}$ auch als formal gegeben. Eine andere Lehrerin (Frau Müller) bezeichnet Ohmsches Gesetz und Widerstandsgesetz als Verallgemeinerung. Dies und die Bezeichnungen Definition oder Gesetz scheinen mit der Art, wie die jeweiligen Formeln im Unterricht eingeführt werden, zu korrelieren (s. auch Beschreibung der Kategorie *Herleitung* in Kap. 12.2.2): Während die Formel $R = \frac{U}{I}$ meist ohne theoretische oder empirische Herleitung deduktiv angegeben wird, werden sowohl das Ohmsche Gesetz als auch das Widerstandsgesetz mit Hilfe von Experimenten induktiv aus Messreihen hergeleitet. Daher bietet es sich für die beiden letzteren an, diese als (empirisches) Gesetz oder als Verallgemeinerung (mehrerer Messergebnisse) zu bezeichnen.

Bei allen LehrerInnen tritt am häufigsten die Unterkategorie *Formel zur Berechnung* auf. Es scheint in dieser Stichprobe zwei Gruppen von LehrerInnen zu geben: Solche, die eine Formel vor allem als *Formel zur Berechnung* bezeichnen (insb. Herr Jasper und Herr Meyer) und solche, die neben dieser Klassifizierung noch mindestens eine weitere Kategorie oft nutzen (insb. Frau Berger, Frau Carle, Frau Gerber und Herr Schmitt) (s. Diagramme D.20 im Anhang).

Die Kategorien *Verallgemeinerung* und *formal gegeben* treten in dieser Stichprobe nur bei einzelnen LehrerInnen auf und müssten an einer größeren Stichprobe noch einmal

überprüft werden, um festzustellen, ob diese Kategorien auch bei anderen LehrerInnen zum Tragen kommen.

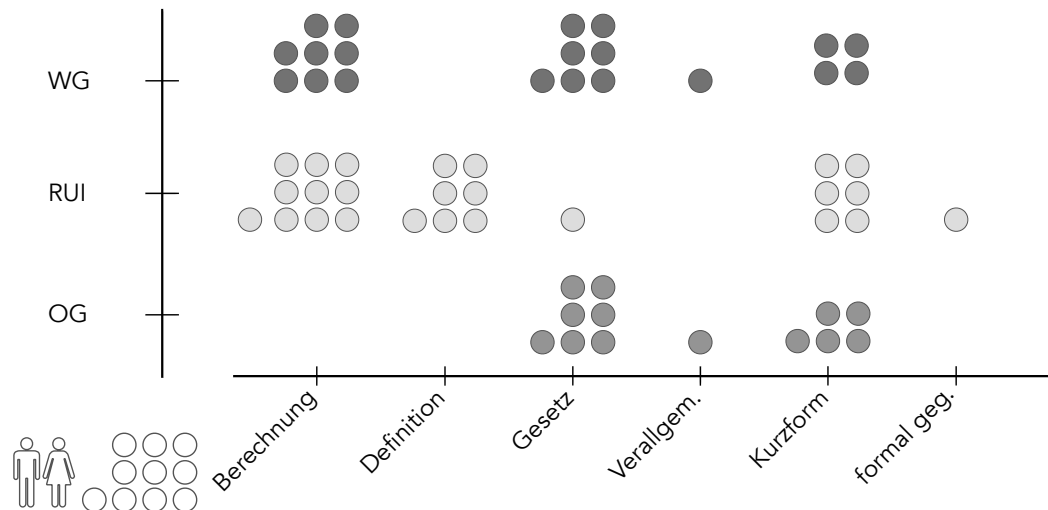


Abbildung 12.32.: Darstellung der Anzahl der LehrerInnen, die für einzelne Formeln die jeweilige Klassifizierung beschreiben

12.3.5. Vergleich von Experiment und Theorie

In einigen Fällen vergleichen LehrerInnen mit einer Formel berechnete Werte mit experimentell ermittelten Werten oder reflektieren rechnerische Ergebnisse auf ihre Genauigkeit hin. Diese Aussagen lassen implizit Rückschlüsse auf eine Metasicht auf Formeln zu. Wenn beispielsweise nach einem solchen Vergleich nach Messungenauigkeiten gefragt wird, dann kann dies implizit die Überlegung enthalten, dass eine Formel immer einen idealisierten Vorgang beschreibt, der im Experiment durch reale Umstände nicht umgesetzt werden kann. Gleichzeitig zeigen solche Überlegungen, dass eine Formel genutzt werden kann, um den Ausgang eines Experimentes zu prognostizieren und in der richtigen Dimensionierung zu planen und gegebenenfalls bei Abweichungen größere Störfaktoren zu suchen und das Experiment zu optimieren.

Für alle drei in der Erhebung betrachteten Formeln können Codings der Kategorie *Vergleich von Experiment und Theorie* zugeordnet werden. Während beim Ohmschen Gesetz nur zwei Textstellen identifiziert werden, sind es für die Definitionsformel und das Widerstandsgesetz in etwa gleich viele Codings (vgl. Diagramm 12.27).

Die Kategorie kommt bei fast allen hospitierten LehrerInnen (wenn auch selten) vor, sodass sie im Unterricht eine gewisse Rolle zu spielen scheint (8 von 10 LehrerInnen,

vgl. Diagramme D.18 im Anhang).

Die Codings der Kategorie *Vergleich von Experiment und Theorie* zeigen eine gewisse inhaltliche Variationsbreite. Diese kann zu folgenden Punkten zusammengefasst werden, die im Anschluss noch näher erläutert werden:

- Experimentelle Werte werden (durch einen Vergleich mit theoretischen Werten) auf ihre **Messgenauigkeit** hin bewertet. (Wurde bei allen 3 Formeln identifiziert, Zitat (1))
- Durch einen Vergleich experimenteller und theoretisch berechneter Werte wird ein **experimenteller Aufbau** auf seine Qualität hin kontrolliert. (Wurde bei Definitionsformel und Widerstandsgesetz identifiziert, Zitat (2))
- Im Experiment ermittelte und berechnete Werte werden mit **Herstellerangaben verglichen**. (Nur für Definitionsformel gefunden, Zitat (3))
- Es wird beschrieben, wie **Literaturwerte ermittelt** werden. (Nur für Widerstandsgesetz gefunden, Zitat (4))

Am häufigsten wird in dieser Erhebung der erste Fall angesprochen. Es werden somit aus Experimenten ermittelte Werte auf ihre **Messgenauigkeit** hin beurteilt (Zitat (1)). Diese Aussagen können zum einen implizit die Qualität der durchgeführten Experimente beurteilen, zum anderen aber auch eine Wertung theoretischer Werte als idealisiert und somit experimentell nicht direkt erreichbar enthalten. Diese Beurteilungen werden jedoch nicht explizit gemacht, wodurch eine Interpretation der Ergebnisse hier schwierig ist. Eine ähnliche Grundaussage kann hinter dem Zitat (5) vermutet werden. Hier weist die Lehrerin die SchülerInnen darauf hin, dass die Genauigkeit berechneter Werte sich immer an der Genauigkeit der Werte orientieren muss, die in die Rechnung hineingesteckt und gegebenenfalls zuvor experimentell ermittelt wurden.

Nur sehr selten, aber sowohl bei der Definitionsformel als auch beim Widerstandsgesetz, geht der unter (1) beschriebene Vergleich noch einen Schritt weiter und führt dazu, den **experimentellen Aufbau** auch tatsächlich konkret zu reflektieren. Dies zeigt Zitat (2), in dem der Lehrer selbst erstaunt über den gemessenen Wert ist und dann auf „Fehlersuche“ geht. Dies verdeutlicht die Funktion einer Formel, Messwerte zu prognostizieren, einen Versuchsaufbau zu planen und zu optimieren.

Ein Vergleich mit Hilfe experimentell ermittelter und anschließend berechneter Werte mit **Herstellerangaben** findet lediglich für die Definitionsformel $R = \frac{U}{I}$ statt. Hier wird der berechnete Werte mit den Angaben auf den Bauteilen verglichen und daraufhin für richtig oder falsch erklärt (Zitat (3)). Dieses Vorgehen bietet sich nur bei Werten

an, die auch in irgendeiner Weise angegeben werden. Prinzipiell könnte dieses Vorgehen natürlich den praktischen Nutzen der Formel in Frage stellen, da Werte ermittelt werden, die ohnehin bekannt sind. Im schulischen Kontext könnten Rechenaufgaben so implizit als reine Übungsaufgaben gewertet werden. Ob dies bei den SchülerInnen aber in der Form verstanden wird oder sie es eventuell sogar als motivierend empfinden könnten, dass sie ihre Werte mit realen Angaben vergleichen können, konnte in dieser Erhebung nicht gezeigt oder überprüft werden.

Der vierte beschriebene Fall geht im Vergleich zum letzten den eher umgekehrten Weg. Hier wird beschrieben, wie **Literaturwerte ermittelt** werden (Zitat (4)). Auf diese Art wird implizit ein praktischer Nutzen von Formeln (das Ermitteln von Literaturwerten) beschrieben. Außerdem erhalten die SchülerInnen Wissen darüber, wie Literaturwerte entstehen und können sie somit erkenntnistheoretisch einschätzen als Werte, die nicht fest gegeben sind, sondern durch Experimente von Menschen ermittelt werden und deren Genauigkeit sich im Optimalfall im Laufe der Zeit verbessert, sodass beispielsweise immer mehr Nachkommastellen angegeben werden können. Diese Genauigkeitsvorstellung kann auch durch das Zitat (5) verstärkt werden, in der die Sinnhaftigkeit von Nachkommastellen angesprochen wird. Diese Vorstellung der „Konstanten“ als von Menschen ermittelt kann dann auch für die Formel selbst gelten: Auch sie ist ein Konstrukt, das aus vielen Experimenten und Messungen resultiert und Ergebnis menschlicher Erkenntnisprozesse, sie kann als empirisches Gesetz diese Messungen zusammenfassen (s. auch Beschreibung der Kategorie *Erkenntnistheoretische Klassifizierung der Formel* in Kap. 12.3.4). Diese inhaltliche Ausprägung wurde nur für das Widerstandsgesetz gefunden und bezieht sich hier in jedem Fall auf die Ermittlung des spezifischen Widerstandes für ein Material.

(1) Frau Carle: „Guckt euch mal die Zahlen an. Die schwanken von bis. Was kommt da raus? Wir haben alle den selben Widerstand benutzt. Also es müssten bei jedem das Ähnliche rauskommen.“ (LRR5, 62)

(2) Herr Jasper: „Das heißt, wenn wir jetzt an unseren (...) Widerstand (...) ein Spannungsmessgerät anschließen, (6 s) sollte, (8 s) eine Spannung von Sieben Komma Sechs Volt anliegen. (...) Wenn wir unsere Messung anschauen, stellen wir fest, (7 s) Mist. (7 s) Warum erhalte ich jetzt hier eine andere Spannung als die, die wir errechnet haben? (6 s) Woran könnte es liegen? [...] Okay, wir stehen wieder vor der Aufgabe gleichzeitige Messung von Stromstärke und Spannung an einem Bauelement. Pest oder Cholera. Was holen wir uns? [...] Entweder stromrichtig oder spannungsrichtige Messschaltung für das gleichzeitige Messen von Stromstärke und Spannung.“

(ABG1, 108-116)

(3) Herr Funke: „Genau DAS steht auf dem benutzten Widerstand auch drauf. Alles korrekt.“ (SBG3, 46)

(4) Frau Carle: „Das heißt also, man hat/ ich hatte euch ja erklärt, man hat von JEDEM Material, wo es GEHT natürlich, logisch, Leiter hergestellt. Ein Meter Länge. Und was für ein Querschnitt? [...] Ein Quadratmillimeter. Und hat DANN ausgemessen, wie groß der Widerstand ist. Wie man DAS dann machen kann, wissen wir. R ist gleich U durch I . Damit kann man das auch machen. Und hat festgestellt/ also für jeden Stoff immer wieder und immer wieder probiert, es kommt immer der selbe Wert raus. So und das ist der SPEZIFISCHE ELEKTRISCHE WIDERSTAND. Und der gibt uns Auskunft über die Leitfähigkeit eines Metalls zum Beispiel. Und die brauchen wir jetzt im WIDERSTANDSGESETZ.“ (LRR11, 37-39)

(5) Frau Müller: „Denkt auch bitte daran, wenn der Taschenrechner so viele Stellen nach dem Komma rausgibt, wir runden sinnvoll. Ein Ergebnis kann niemals genauer sein als der gegebene Wert. Die gegebenen Werte haben eine Stelle nach dem Komma. Dann kann unser Widerstand nicht fünf Stellen nach dem Komma haben, sondern maximal auch EINE.“ (BTR3, 132)

Diese Kategorie zeigt, dass es relativ viele Ansätze gibt, über einen Vergleich auf unterschiedlichem Weg erhaltener Werte, etwas über die Aussagen einer Formel und darüber, wozu eine Formel genutzt werden kann, zu lernen. Diese Gelegenheiten bleiben im hospitierten Unterricht dieser Erhebung implizit und werden nicht weiter ausgeführt.

12.3.6. Analogie zu anderen Formeln

Eine Möglichkeit, zum einen etwas über die mathematische Struktur einer Formel zu lernen, aber auch die spezifische physikalisch-mathematische Bedeutung der mathematischen Struktur in Verbindung mit den physikalischen Formelzeichen und ihren Bedeutungen zu reflektieren, bietet der Vergleich zweier Formeln. Für diesen Vergleich bietet sich die mathematische Oberflächenstruktur an, die Ausgangspunkt für weitere inhaltliche Überlegungen sein kann. Solche Vergleiche werden zur Kategorie *Analogie zu anderen Formeln* zusammengefasst.

Die einzige Formel, für die solche Analogien vorkommen, ist in dieser Erhebung die Definitionsformel $R = \frac{U}{I}$. Insgesamt nutzen 4 LehrerInnen den Vergleich der Formel

$R = \frac{U}{I}$ mit anderen Formeln. Dabei fokussieren sich die einzelnen LehrerInnen auf jeweils eine andere Formel. Herr Lenz nutzt den Vergleich mit der Definitionsformel des Druckes $p = \frac{F}{A}$, Herr Schmitt, Herr Meyer und Frau Carle vergleichen die Formel für den Widerstand mit der zuvor im Unterricht behandelten Formel für die Geschwindigkeit $v = \frac{s}{t}$ (wobei F ...wirkende Kraft; A ...Fläche, auf die Kraft wirkt; s ...zurückgelegter Weg; t ...Zeit, in der Weg zurückgelegt wird).

Die Vergleiche werden mit unterschiedlichen Zielstellungen durchgeführt, die im Folgenden näher beleuchtet werden sollen. Analogien werden im untersuchten Unterricht genutzt, um...

- ...an einer anderen Formel eingeübte **Methoden** zu reaktivieren. (Zitat (1))
- ...die **Aussageart** (erkenntnistheoretische Klassifizierung) einer Formel zu verstehen. (Zitat (2))
- ...ein besseres Verständnis der **Einheiten** zu ermöglichen. (Zitat (3))
- ...ein anschaulicheres **Verständnis** der in der Formel definierten Größe zu ermöglichen. (Zitat (4))

Jede Lehrkraft nutzt in dieser Erhebung nur eine dieser Zielstellungen. Zum Teil wurden mehrere Textstellen zu dieser einen Analogie codiert, da an verschiedenen Stellen im Unterricht auf sie verwiesen wird. Dies führt zu den unterschiedlichen Häufigkeiten der LehrerInnen (s. Diagramme D.18 im Anhang). Bei Beispiel (1) und (2) wird die Analogie genutzt, um Wissen über Methoden oder die Aussageart einer Formel zu reaktivieren und dies auf die neu gelernte Formel zu übertragen. SchülerInnen werden daran erinnert, dass sie etwas Bestimmtes mit einer anderen Formel bereits gemacht haben (1) oder dass eine Formel schon vorher genutzt wurde, um eine neue Größe zu definieren (2). Bei den Beispielen (3) und (4) werden die Vergleiche genutzt, um ein inhaltliches Verständnis der Formel zu verbessern. Insbesondere bei der hier betrachteten Formel für den elektrischen Widerstand erscheint es dabei sinnvoll, hierfür eine Analogie zur wesentlich anschaulicheren Größe der Geschwindigkeit zu wählen und anschauliche Vorstellungen, die die SchülerInnen im Themengebiet der Mechanik erlernen konnten, auf die weniger anschauliche Elektrizitätslehre zu übertragen.

(1) Herr Lenz: „Wir haben eine Gleichung und werden die jetzt der Reihe nach nach jeder Größe umstellen. Weil ihr wisst ja, p ist gleich F durch A hat ungefähr die gleiche Struktur. Wie stellen wir Gleichungen um?“ (HBG2, 21)

(2) Herr Meyer: „Sind zwei Volt durch Ampere! Das muss ja was BEDEUTEN! Und DAS formuliert man jetzt als neue physikalische Größe, nämlich als Widerstand. Dieser Zusammenhang ist jetzt neu in der Überschrift. Das Verhältnis von Weg und Zeit haben wir in der sechsten Klasse als Geschwindigkeit definiert. Und das definieren wir jetzt als Widerstand.“ (EPR4, 29)

(3) Herr Schmitt: „EIN Meter pro Sekunde, machen wir mal nicht einen Meter, machen wir mal 33 Meter pro Sekunde [...] Und jetzt haben wir beispielsweise, ja behalten wir unsere Zahl, 33 OHM, was ja das gleiche ist wie 33 VOLT durch AMPERE (...) heißt also jetzt wieder übersetzt, ich brauche 33 VOLT (...) PRO (...) EINEM Ampere. Also um den Strom von einem Ampere fließen zu lassen“ (SSG3, 78)

(4) Frau Carle: „Ich habe nur die zwei Größen. Ich habe die Spannung und die Stromstärke. Beim Laufen hatte ich, oder beim Geschwindigkeit Ermitteln hatte ich den Weg und die Zeit. Ich wiederhole noch einmal. Hört genau zu, was ich sage. Bei der Geschwindigkeitsermittlung KANN ich den WEG konstant lassen und die ZEIT ermitteln. ODER ich kann die Zeit konstant lassen und den Weg ermitteln. Habt ihr den Zusammenhang Geschwindigkeit rausgekriegt. Na, wie ist denn das bei Spannung und Stromstärke?“ (LRR2, 82)

Die Ergebnisse zu dieser Kategorie zeigen, dass verschiedene LehrerInnen die Strategie des Vergleichs mit anderen Formel nutzen, um etwas über eine neue Formel zu lernen oder bereits Gelerntes auf die neue Formel zu übertragen. Die Zielstellungen, mit denen diese Vergleiche gemacht werden, unterscheiden sich von LehrerIn zu LehrerIn. Im Rahmen dieser Erhebung konnte diese Strategie nur für $R = \frac{U}{I}$ beobachtet werden. Dies kann daran liegen, dass in der achten Klassenstufe das Repertoire bekannter Formeln noch relativ klein ist. Damit bieten sich nicht für alle Formeln Vergleiche an, da das entsprechende Pendant noch unbekannt sein könnte. Die Formel $R = \frac{U}{I}$ bietet sich jedoch für einen Vergleich an, da die Struktur der Entsprechung einer Größe und eines Quotienten bei vielen Größen der Physik vorkommt.

12.3.7. Merkhilfen

Für einige Formeln gibt es Eselsbrücken als Merkhilfen oder anderweitige Hilfsmittel. Diese können den SchülerInnen bei der reinen Memorierleistung oder dem mathematischen Arbeiten mit Formeln helfen.

In dieser Erhebung werden nur für die Definitionsformel $R = \frac{U}{I}$ solche Hilfestellungen vorgeschlagen (s. Diagramm 12.27). 4 der LehrerInnen präsentieren als Hilfestellung für das Umstellen der Formel eine Pyramide (s. Abb. 12.33), aus der die Formel selbst und auch ihre umgestellten Varianten abgelesen werden können. Die gesuchte Größe wird jeweils zugehalten und die anderen zwei Größen stehen dann entweder nebeneinander, dann werden sie miteinander multipliziert, oder übereinander, dann werden sie dividiert. Herr Funke nennt den SchülerInnen außerdem die Eselsbrücke „RUDI“, die er auch in drei weiteren Stunden jeweils einmal wiederholt:

„Ich habe diese Formel damals zu Schulzeiten selber wie folgt gelernt.
[...] Ich kann mir extrem viele Formeln so merken. Und zwar R ist U durch I . Rudi. Also sobald irgendjemand Rudi sagt, wisst ihr: elektrischer Widerstand.“ (SBG2, 17)

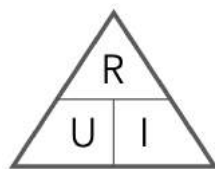


Abbildung 12.33.: Pyramide als Hilfestellung für das Umstellen der Formel $R = \frac{U}{I}$

Diese Hilfestellungen dienen dabei nicht der Förderung eines konzeptionellen Verständnisses. Die Pyramide hilft bei fehlenden mathematischen Fähigkeiten und ist laut eines Lehrers insbesondere „für diejenigen, die nicht mathematisch umstellen wollen, sondern durch das Bauchgefühl umstellen wollen“ (ABG1, 98). Diese Hilfestellungen haben auch „nicht den Anspruch, dass man es verstanden hat.“ (BTR3, 120), wie eine andere Lehrerin betont. Unter dem Aspekt, dass es aber für den Physikunterricht, wie von vielen LehrerInnen in dieser Erhebung betont, wichtig ist, dass man sich Formeln merkt, haben sie aber eine Relevanz (s. auch die Betrachtungen zur Kategorie *Wichtigkeit oder Vorteile einer Formel* in Kap. 12.3.1). Sie könnten einen Ansatz bieten, um sich über die derart gemerkte Formel auch physikalische Inhalte besser zu merken, die aus der Formel abgeleitet werden. Diese strukturelle Funktion einer memorierten Formel wird jedoch in dieser Erhebung von keiner Lehrkraft im Unterricht angesprochen.

12.3.8. Metareflexion über Sprache

Wenn LehrerInnen einzelne in einer Formel enthaltene Termini auf einer Meta-Ebene sprachlich reflektierten, dann hilft dies, eine Vorstellung über die einzelnen Termini

zu gewinnen oder die Termini mit vorhandenem Wissen zu verknüpfen. Daher sind diese Metainformationen zu den Termini auch mit der Formelbedeutung verknüpft (s. auch Kap. 3.3.2 im Theorieteil zu semantischen Netzwerken). Solche Aussagen werden zusammengefasst zur Kategorie *Metareflexion über Sprache*. Diese Kategorie ist somit eng verwandt mit der Kategorie *Beschreibung einzelner Größen* (s. Kap. 12.2.7), da sie sprachliche Metainformationen zu diesen einzelnen Größen beinhaltet.

Solche sprachlichen Metainformationen finden sich fast ausschließlich für die Definitionsformel $R = \frac{U}{I}$. Nur eine Codierung bezieht sich auf das Widerstandsgesetz (vgl. Diagramm 12.27). In dieser Kategorie kommt die Unterschiedlichkeit der in dieser Erhebung betrachteten Formeln zum Tragen: Als Definitionsformel definiert die Formel $R = \frac{U}{I}$ den elektrischen Widerstand. Daher werden alle Aussagen zum elektrischen Widerstand auf diese Formel bezogen und die Begriffsbildung zum elektrischen Widerstand nimmt im beobachteten Unterricht eine größere Rolle ein, als die Begriffsbildung zu anderen Formelzeichen und ihren zugehörigen Termini wie der Länge eines Drahtes l oder den vermutlich im vorhergehenden Unterricht umfassender behandelten Größen Spannung U oder Stromstärke I .

Für die Definitionsformel existieren drei inhaltliche Ausprägungen der Kategorie. Diese werden im Folgenden näher beschrieben. Über den Widerstand wird sprachlich reflektiert, indem:

- die **Rechtschreibung** des Terminus Widerstand (mit Bezug auf die Bedeutung des Präfixes „wider“) thematisiert wird (Zitat (1))
- das **Formelzeichen** fremdsprachlich motiviert wird (Zitat (2))
- die **Polysemie** (Mehrdeutigkeit) des Terminus Widerstand diskutiert wird (Zitat (3))

Besonders häufig wird von LehrerInnen in der Erhebung betont, dass der elektrische Widerstand nur mit einfachem i , nicht mit i -e **geschrieben** wird. In einigen Fällen wird dies auch auf die unterschiedlichen Bedeutungen der Präfixe „wider“ und „wieder“ bezogen, wie das Zitat (1) zeigt. In anderen Fällen wird lediglich an die korrekte Rechtschreibung erinnert („Widerstand NICHT mit i -e.“ BTR4, 127). Diese Variante wird von allen 8 LehrerInnen genutzt, bei denen diese Kategorie vorkam. Auf diese Art betont die Lehrkraft die etymologische Verwandtschaft des Wortes Widerstand mit anderen aus dem Alltag bekannten Worten, die das Präfix wider enthalten. Die Verknüpfungen mit alltäglichen Vorstellungen von widerstehen, widersetzen oder Ähnlichem können zur physikalischen Begriffsbildung beitragen.

In vielen anderen Fällen wird die fremdsprachliche Herkunft des **Formelzeichens** R für den Widerstand genannt. Hierbei beziehen sich die LehrerInnen auf das englische „resistance“, lateinisch „Resistente“ und das aus dem Geschichtsunterricht eventuell bekannte Fremdwort „Resistenz“. In einem Fall sprechen die SchülerInnen das im Tafelwerk vermerkte „Resistance“ Französisch aus, sodass auch die Bedeutung dieser Sprache dann aufgegriffen wird (Zitat (2)).²⁰ Diese Verknüpfungen mit fremdsprachlichen Wörtern können helfen, das Formelzeichen mit dem entsprechenden Terminus zu verknüpfen. Sie dienen als eine Eselsbrücke für das Einprägen der richtigen Zuordnung von Formelzeichen und Terminus.

Eine Reflexion über einzelne Formelzeichen auf einer sprachlichen Meta-Ebene findet in einem Fall auch in Bezug auf das Widerstandsgesetz statt. In diesem Fall spricht Frau Carle über die Bedeutung des Adjektivs spezifisch beim spezifischen elektrischen Widerstand ρ als „auf eine Sache bezogen“ (LRR11, 37, ausführliches Zitat im Anhang unter D.6.5). Auch hier wird der fachsprachliche Terminus spezifisch mit Alltagssprache verknüpft und bietet den SchülerInnen somit eine Eselsbrücke, sich den Terminus und seine zugehörige Bedeutung besser zu merken.

Die dritte inhaltliche Ausprägung betrifft den elektrischen Widerstand. Hier liegt auch innerhalb des Faches Physik eine Doppelbelegung des Begriffes (Polysemie) vor. Der Begriff Widerstand meint zum einen die über die Formel $R = \frac{U}{I}$ definierte physikalische Größe, zum anderen ist mit Widerstand aber oft auch ein elektrisches Bauteil gemeint, das den Stromfluss in einem Stromkreis gezielt begrenzt. Diese zwei Bedeutungen sind im Tafelbild in Abbildung 12.34 dargestellt und werden auch im Zitat (3) aufgegriffen. Diese Doppelbedeutung wird in der Erhebung von 3 LehrerInnen angesprochen.

(1) Herr Schmitt: „Ja, wieder ist im Endeffekt, wenn was sich WIEDERHOLT, im Sinne von ich komme wieder. Dann schreibt man es mit I-E, aber das ist jetzt gemeint wider im Sinne von gegen. Also ich tue dies WIDER seiner Meinung. Also GEGEN seine Meinung. Und dieses WIDER schreibt man eben bloß mit I.“ (SSG3, 25)

(2) Herr Schmitt: „Englisch resistance und Französisch natürlich resistance. Man kennt vielleicht diesen Ausspruch ‘viva la resistance’, es lebe der Wi-

²⁰In der selben Klasse wird ebenfalls von den SchülerInnen ausgehend über den veralteten Begriff „Ohm“ für Onkel gesprochen und mit dem Formelzeichen und altgriechischem Buchstaben Ω in Verbindung gebracht. Da diese Aussage von SchülerInnen motiviert wird und nicht explizit vom Lehrer ausgehend beschrieben wird, und bei dieser Erhebung der Schwerpunkt der Beobachtung auf der Lehrerperspektive liegt, soll dies hier nur am Rande betrachtet werden. Das Zitat im Anhang unter D.6.5 stellt den entsprechenden Ausschnitt aus dem Unterrichtstranskript dar.

derstand. Also hier kann man sich eigentlich ganz gut merken. Schreiben wir mal dahinter, wenn ihr da eher Ambitionen habt, französisch RESISTANCE. Man kann es natürlich auch Französisch aussprechen.“ (SSG3, 35)

(3) Frau Berger: „Wir haben gelernt: Formel des Widerstandes und (sind dann?), dass der Widerstand eine Eigenschaft von einem Bauelement sein kann. (Entweder?), dass der Widerstand aber auch eine physikalische Größe ist, die ich berechnen kann“ (AWR5, 26)

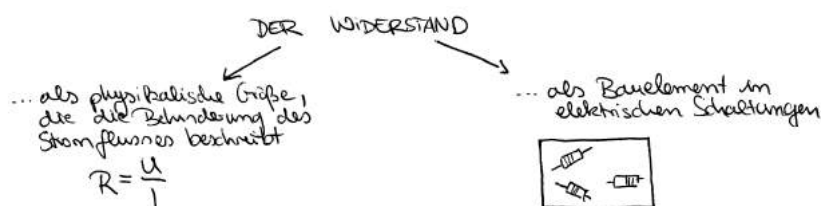


Abbildung 12.34.: Ausschnitt aus der Abschrift eines Tafelbilds zur doppelten Bedeutung des Begriffes Widerstand (KPR10, TB)

Vergleich der LehrerInnen: Die Kategorie kommt bei 8 der 10 hospitierten LehrerInnen in etwa der gleichen absoluten Häufigkeit (2 bis max. 6 Codierungen pro LehrerIn) vor (s. Diagramme D.18 im Anhang). Dies lässt auf eine gewisse Übertragbarkeit auf Unterricht im Allgemeinen schließen. Es müsste jedoch noch überprüft werden, ob sie für andere Definitionsformeln ebenfalls vorkommt oder insbesondere beim Widerstand auftritt, da sich hier eine sprachliche Reflexion durch die für SchülerInnen oft schwierige Rechtschreibung besonders anbietet. Zumindest die Reflexion über fremdsprachliche Herkunft von Formelzeichen sollte aber für andere Formeln eine ähnliche Relevanz haben.

Bei Herrn Schmitt tritt diese Kategorie in allen drei inhaltlichen Ausprägungen in besonderer inhaltlicher Tiefe auf. Hieraus könnte man schließen, dass er eine besondere Sensibilität gegenüber sprachlichen Besonderheiten aufweist, die sich neben den zwei oben genannten Zitaten auch im Umgang mit der Polysemie des Begriffes Widerstand zeigt. Er schlägt als Lösung vor, das Bauteil nur als Widerstand und die Größe immer mit der Spezifizierung „elektrischer“ Widerstand zu bezeichnen: „Wenn ich vom elektrischen Widerstand spreche, meine ich immer die PHYSIKALISCHE Größe. Spreche ich NUR vom Widerstand, meine ich das Bauteil. Das ist ein bisschen unglücklich von der Namensgebung. Das Bauteil, was ihr in den Händen halten könnt, ist ein Widerstand. Aber die physikalische Größe heißt eben AUCH Widerstand. Deswegen unterscheiden wir Bauteil Widerstand, physikalische Größe ELEKTRISCHER Widerstand.“ (SSG3, 90)

Zusammenfassend finden sich in dieser Kategorie Aussagen zu Rechtschreibung, Wortbedeutungen und Herkunft der Formelzeichen. Es ist zu vermuten, dass insbesondere Wortbedeutungen auch für andere Formeln relevant sind und in anderen Fällen zum Beispiel auch Abgrenzungen zu alltagsprachlichen Wortbedeutungen beinhalten könnten. Die Thematisierung der Rechtschreibung ist vermutlich nur in diesem Fall des elektrischen Widerstandes relevant. Die Beschäftigung mit der Herkunft eines Formelzeichens und möglichen Verknüpfungen mit fremdsprachlichen Wörtern hingegen sollte im Idealfall für alle Formelzeichen, bei denen dies möglich ist, geschehen.

13. Bezug des Kategoriensystems zum Ebenenmodell: Welche sprachlichen Varietäten nutzen LehrerInnen beim Sprechen mit und über Formeln?

Für die Strukturierung und Analyse der in den Kapiteln 12.1, 12.2 und 12.3 erhaltenen Ergebnisse soll folgend das Ebenenmodell der Versprachlichung von Formeln genutzt werden (beschrieben in Kap. 5, s. auch Beschreibung der Methodik in Kap. 9.2). Zunächst soll beschrieben werden, wie das Kategoriensystem und das Ebenenmodell im Einzelnen zusammenhängen, sodass eine Zuordnung der Kategorien zu den Ebenen erfolgen kann (Kap. 13.1). Hierauf aufbauend erfolgt eine weitere Analyse der Kategorien und ihrer Häufigkeiten auf Grundlage der Ebenen (Kap. 13.2). Dies ermöglicht eine Analyse der verwendeten Sprache der LehrerInnen hinsichtlich der Varietäten Alltagssprache, Unterrichtssprache und Fachsprache und bildet die Grundlage für die Beschreibung verschiedener Sprachtypen (Kap. 13.3).

13.1. Zuordnung von Kategorien und Ebenen

Jeweils mehrere Ebenen werden zu einer übergeordneten inhaltlichen Oberkategorie zusammengefasst (vgl. Abb. 13.1). Die Ebenen I-III finden sich in der Kategorie *Formel wird gesprochen* wieder. Diese Oberkategorie enthält die Kategorien *Formel*, *Wortformel*, *Formelsatz mit Formelzeichen* und *Formelsatz mit Termini*, die direkt mit den entsprechenden Ebenen I, IIA, IIB und III übereinstimmen. Die Meta-Ebene kann direkt der Oberkategorie *Über Formel wird gesprochen* zugeordnet werden.

Die Ebenen IV, V und VI enthalten Kontextualisierungen, Anwendungen und Interpretationen einer Formel, die sprachlich und aufgrund ihrer Mathematisierung zu unterscheiden sind (s. Beschreibung der Ebenen in Kap. 5.4, insb. auch Abb. 5.7). Da diese einzelnen Arten der Anwendung oder Interpretation in unterschiedlichen sprachlichen oder mathematischen Ausprägungen vorkommen, differenzieren sich die Ebenen des

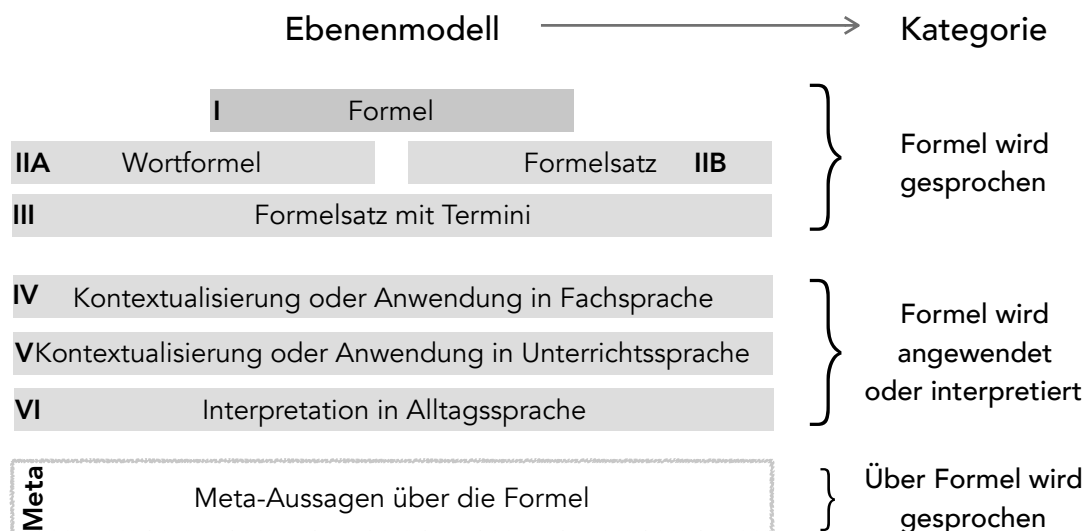


Abbildung 13.1.: Zuordnung des Ebenenmodells zu den Oberkategorien des Kategoriensystems

Ebenenmodells hier erst in den Unterkategorien aus.

In Tabelle 13.1 erfolgt eine begründete Zuordnung der Kategorien zu den Ebenen. Erstes Unterscheidungsmerkmal für eine Ebenenzuordnung ist der Grad der Quantifizierung der Aussage. Als zweites Unterscheidungsmerkmal wird gegebenenfalls die sprachliche Ausdrucksform berücksichtigt. Grundsätzlich erfolgt die Unterscheidung von Fachsprache, Unterrichtssprache und Alltagssprache nach den in Kapitel 4.3 dargestellten Merkmalen der drei sprachlichen Varietäten. In Grenzfällen wird der Fokus auf die verwendete Lexik gesetzt. Werden ausschließlich Fachbegriffe genutzt, dann wird eine Aussage als fachsprachlich klassifiziert. Werden einzelne Termini durch andere Begriffe ersetzt, die insbesondere im Unterrichtskontext Verwendung finden und fachsprachlich nicht präzise sind, dann wird eine Aussage als unterrichtssprachlich eingeordnet. Bei alltagssprachlichen Äußerungen werden (nahezu) keine Fachbegriffe im Sinne ihrer definierten Bedeutung, sondern vorrangig alltägliche Begriffe im Sinne ihres alltäglichen Kontextes verwendet.

Kategorie	Unterkategorie	Ebene	Begründung
Rechnung		IV	rein quantitativ
Herleitung		IV	mathematische Herleitungen

Kategorie	Unterkategorie	Ebene	Begründung
Messprinzip		IV	beschreibt Vorgehen einer Rechnung, impliziert quantitatives Vorgehen
Einheit		V (IV)	quantitativ, unterrichtssprachlich
Zusammenhang	Proportionalität	IV	Proportionalität wird als mathematische Eigenschaft ausgedrückt
	↑↑/↑↓ Richtung		
	...Fachsprache	IV	halbquantitativ, fachsprachlich
	...Unterrichtsspr.	V	halbquantitativ, unterrichtssprachlich (nicht ausschließlich Termini)
	Maß d. Veränd.	V (IV)	halbquantitativ, unterrichtssprachl.
	Verdoppelung...	IV	quantitativ, fachsprachlich
	je-desto-Satz	IV	quantitativ, feste fachsprachliche Wendung
	Quot.-/Prod.gl.h.	IV	quantitativ, fachsprachlich
	abhg. von	V	qualitativ
	Spezialfälle	IV	quantitativ, meist konkrete Werte
Anwendung	genannt	V	kein math. Verhalten beschrieben
	erklärt	IV	quantitativ, math. Verhalten beschrieben
Modell		V	math. Verhalten meist angedeutet, unterrichtssprachlich
Analogie		VI	math. Verhalten nur implizit beschrieben, alltagssprachlich
Größen	Formelz., Einheit	V	qualitativ, kein math. Verhalten beschrieben, unterrichtssprachlich
	einzelne Größen	VI (V)	

Tabelle 13.1.: Zuordnung der Kategorien von *Formel wird angewendet oder interpretiert* zu den Ebenen des Ebenenmodells

In einigen Fällen ist keine eindeutige Zuordnung einer gesamten Kategorie zu einer Ebene möglich, da einzelne Codierungen nicht eindeutig einer sprachlichen Varietät oder einem Quantifizierungsgrad zugeordnet werden können oder Einzelcodierungen

von der in Tabelle 13.1 dargestellten Zuordnung abweichen. In diesen Fällen wurden die Ebenen angegeben, zu denen der Großteil der Codierungen einer Kategorie zugeordnet werden kann. In Klammern wird die Ebene für Einzelfälle angegeben.

In der Kategorie *Einheit* müssen einzelne Aussagen in Ebene IV eingeordnet werden. Dies trifft auf wenige Aussagen zu, bei denen explizit beschrieben wird, welche Einheiten sich entsprechen: „Das heißt also, ein Ohm Widerstand heißt bei einem Volt ein Strom von einem Ampere gegeben.“ (KTH3, 41) oder Aussagen, bei denen lediglich der Bruchstrich durch ein „pro“ interpretiert wird: „1 Volt pro Ampere“ (KTH2, AB)

Die Unterkategorie *Maß der Veränderung* ist überwiegend halbquantitativ und unterrichtssprachlich. Oft taucht beispielsweise die Formulierung auf, dass die Veränderung zweier Größen „gleich“ sei. Wenn explizit von Veränderung in gleichem oder umgekehrtem Maß als Eigenschaft einer direkten oder umgekehrten Proportionalität argumentiert wird, sind diese Aussagen eher quantitativ und auch sprachlich eher fachsprachlich einzuordnen (z. B.: „Also im GLEICHEN MASZE wie die eine Größe sich verändert, verändert sich die andere.“, EPR4, 28). Diese Aussagen sind jedoch seltener zu finden.

Die Kategorie *Beschreibung einzelner Größen* beschreibt einzelne Größen für sich und setzt diese nicht miteinander in Beziehung. Damit sind alle Aussagen in dieser Kategorie qualitativ. Sprachlich gibt es jedoch Unterschiede. Die Unterkategorie *Größe-Formelzeichen-Einheit* ist unterrichtssprachlich, da hier die Termini ihren Formelzeichen und Einheiten zugeordnet werden. Die Einheiten werden in diesem Zusammenhang oft auch als die abkürzenden Buchstaben für die Einheiten gesprochen: „U in V“ (HBG3, 5), sprich: U in Vau. Dies ist ein rein unterrichtssprachliches Vorgehen, das sich auf Vermittlungskontexte beschränkt und so in der Fachsprache nicht vorkommt, da in der Expertenkommunikation von einem Verstehenskonsens ausgegangen wird. Die Unterkategorie *einzelne Größen*, bei der einzelne Größen umschrieben werden, ist in den meisten Fällen Alltagssprachlich (dies wird auch im Codierleitfaden gefordert, s. B.1). In einzelnen Fällen sind die Aussagen aber durch viele Fachbegriffe verknüpft, sodass sie als unterrichtssprachlich einzuordnen wären. Dies ist insbesondere bei Formulierungen der Fall, die im Unterrichtskontext immer wieder zur Beschreibung dieser Größe genutzt werden. Ein Beispiel ist die Umschreibung der Spannung als „Antrieb“ der Elektronen oder die Formulierung, der Widerstand sei „ein Maß für die Behinderung des elektrischen Stromes“. Insbesondere letzteres Beispiel zeigt auch syntaktisch deutliche Entfernungen zur Alltagssprache (Substantivierung Behinderung statt aktiver Formulierung mit Verb behindern, Begriffe Maß und elektrischer Strom).

Es ist denkbar, dass einzelne Kategorien, die in dieser Erhebung ausschließlich in der Ebene IV vorkommen, auch in den Ebenen V oder VI denkbar sind, wenn sprachlich

eher Unterrichts- oder Alltagssprache genutzt werden würde oder die Mathematisierung weniger stark ausgeprägt wäre. Ein Beispiel wäre die Beschreibung des Zusammenhangs zwischen zwei Größen in Alltagssprache, indem dieser Zusammenhang direkt an einem Alltagsbeispiel verdeutlicht wird.¹

Die Ebenen IV, V, VI und die Meta-Ebene zeigen insgesamt eine große Variationsbreite, die sich in den zugeordneten Kategorien widerspiegelt (vgl. Abb. 13.2). Die meisten Kategorien sind der Ebene IV zuzuordnen. Damit weisen viele Aussagen ein hohes Maß an Quantifizierung auf oder sind fachsprachlich formuliert. Nur sehr wenige Aussagen können der Ebene VI zugeordnet werden. In Bezug auf Formeln werden in dieser Erhebung somit nur sehr wenige Aussagen in Alltagssprache gemacht. Kategorien, die nur in Einzelfällen dieser Ebene zuzuordnen sind, werden in der Abbildung 13.2 grau dargestellt.



Abbildung 13.2.: Zuordnung der Kategorien zu den Ebenen des Ebenenmodells

¹Konkret könnte der Zusammenhang der Verdopplung zweier Größen bei direkter Proportionalität so beschrieben werden: Wenn ich von meiner Oma immer zwei Stück Schokolade bekomme, wenn ich sie besuche, dann bekomme ich bei zwei Besuchen also vier Stück Schokolade, bei vier Besuchen acht Stück Schokolade. Ich bekomme also immer doppelt so viel Schokolade wie die Male, die ich bei ihr war.

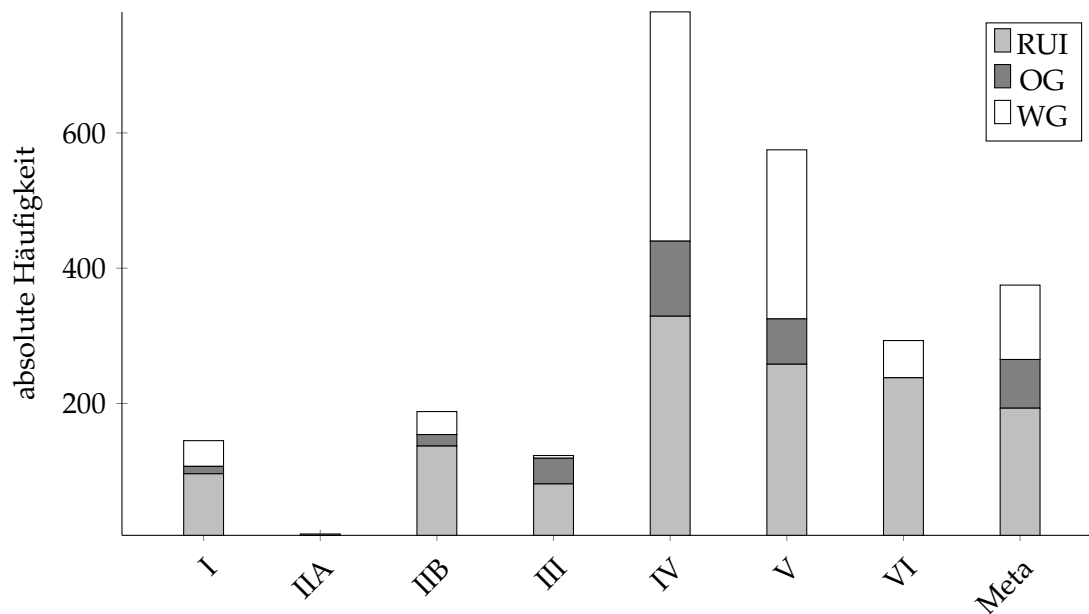


Abbildung 13.3.: Codehäufigkeiten der Ebenen des Ebenenmodells

13.2. Häufigkeitsanalysen bezogen auf die Ebenen

Betrachtet man die Häufigkeiten der Codings für die einzelnen Ebenen des Ebenenmodells (Diagramm 13.3), dann wird deutlich, dass sich hier die zuvor beschriebene unterschiedliche Anzahl zugeordneter Kategorien (s. Abb. 13.2) widerspiegelt. Ebene IV weist mit Abstand die meisten codierten Textstellen auf. Dies trifft sowohl für die aufsummierten Gesamtcodings als auch für die einzelnen Formeln zu (s. Diagramme D.21 im Anhang). Wenn Formeln sprachlich angewendet oder interpretiert werden, dann geschieht das in dieser Erhebung meist in Fachsprache, seltener in Unterrichtssprache und am seltensten in Alltagssprache. Über alle in dieser Erhebung betrachteten Formeln aufsummiert werden seltener Aussagen in Alltagssprache gemacht, als dass auf einer Meta-Ebene über eine Formel gesprochen wird. Dieses Bild sieht für die Definitionsformel $R = \frac{U}{I}$ anders aus. Bei dieser Formel werden häufiger Aussagen in Alltagssprache als auf einer Meta-Ebene gemacht (s. Diagramme D.21 im Anhang). Dies könnte insbesondere auf die Begriffsbildung zum elektrischen Widerstand zurückzuführen sein.

13.3. Charakterisierung der Lehrersprache

Die Verteilungen der Ebenen für die einzelnen an der Erhebung beteiligten LehrerInnen zeigen im Großen und Ganzen ein ähnliches Bild wie die Gesamtverteilung in Diagramm 13.2 (s. Diagramme D.22 im Anhang): Formeln werden wesentlich häufiger angewendet oder interpretiert (Ebenen IV, V, VI und die Meta-Ebene) als geschrieben oder gesprochen (Ebenen I, IIA, IIB und III). Bei vielen LehrerInnen werden Formeln am häufigsten in Fachsprache angewendet oder interpretiert (Ebene IV weist die meisten Codings auf), Formeln werden häufiger mit Formelzeichen (IIB) als mit Termini (III) gesprochen.

Im Umgang mit den einzelnen sprachlichen Ebenen des Ebenenmodells zeigen sich jedoch einige Unterschiede, die im Folgenden diskutiert werden sollen und in Tabelle 13.2 zusammengefasst sind. Aus diesen Unterschieden lässt sich der Umgang mit Sprache durch die einzelnen LehrerInnen charakterisieren.

Umgang mit Fachsprache: Bei 7 von 10 LehrerInnen ist Ebene IV die Ebene mit den meisten codierten Textstellen. Zum einen gibt es LehrerInnen, bei denen die Ebene IV (Fachsprache) deutlich gegenüber den anderen Ebenen überwiegt. Sie nutzen also mit Abstand häufiger Fachsprache als andere sprachliche Varietäten bei der Anwendung und Interpretation von Formeln. Hierzu zählen Frau Berger, Herr Funke und Herr Lenz². Diese LehrerInnen zeichnen sich somit durch einen verstärkten Gebrauch von Fachsprache aus. In Tabelle 13.2 wird daher bei Fachsprache ein „+“ vermerkt. Andere LehrerInnen nutzen ebenfalls am häufigsten Fachsprache, jedoch gleichzeitig in relevanter Häufigkeit Unterrichts- und Alltagssprache. Die Unterschiede in den Häufigkeiten der Ebenen IV, V und VI sind somit weniger deutlich, was sich in einer homogenen Häufigkeitsverteilung ohne deutliches Maximum zeigt. Bei diesen LehrerInnen nimmt die Fachsprache im Vergleich zu den anderen Sprachebenen eine moderate Rolle ein (s. Diagramme D.22 im Anhang), in Tabelle 13.2 wird daher eine „0“ vermerkt.

Umgang mit Unterrichtssprache: Ausnahmen vom zuvor beschriebenen Muster stellen Herr Schmitt, Herr Weber und Frau Gerber dar. Diese drei LehrerInnen sprechen bei der Anwendung und Interpretation von Formeln am häufigsten in Unterrichtssprache (Ebene V). In Tabelle 13.2 wird dies durch ein „+“ bei Unterrichtssprache vermerkt. Bei Herrn Schmitt und Herrn Weber werden allen drei Ebenen IV, V und VI ähnlich viele Codings zugeordnet. Die Unterrichtssprache stellt somit bei ihnen kein deutliches Maximum in der Verteilung dar, bei ihnen liegt im Großen und Ganzen ein

²Bei Herrn Lenz ist dieser Unterschied am deutlichsten zu erkennen: Ebene IV: 99 Codings, Ebene I: 25 Codings, Ebene V: 23 Codings

ausgewogenes Verhältnis der drei Ebenen IV, V und VI vor (s. Diagramme D.22 im Anhang). Bei Frau Gerber ist der Häufigkeitsunterschied zu den anderen Ebenen am deutlichsten zu erkennen (91 Codings in Ebene V, 51 in Ebene IV; s. Diagramme D.22 im Anhang). Dies könnte auf die Schulart, in der sie unterrichtet, zurückgeführt werden. Sie unterrichtet die einzige an der Erhebung beteiligte Hauptschulklasse. Hier ist laut Lehrplan ein deutlich geringeres Maß an Mathematisierung vorgesehen. Dies scheint sich mit diesen Ergebnissen auch in der von ihr verwendeten Sprache zu zeigen. Mit Herrn Schmitt (Gymnasium) und Herrn Weber (Mittelschule - Realschulklasse) sind in der Gruppe der LehrerInnen, die Ebene V am häufigsten verwenden, aber insgesamt alle 3 in der Erhebung berücksichtigten Schulformen vertreten. Bei Frau Carle, Herrn Meyer und Herrn Jasper ist von einer moderaten Rolle der Unterrichtssprache zu sprechen („0“ in Tabelle 13.2).³

Umgang mit Alltagssprache: Auffällig sind zudem die Häufigkeitsunterschiede bei der Verwendung von Alltagssprache (Codings, die Ebene VI zugeordnet werden). Zum einen gibt es LehrerInnen, bei denen Alltagssprache bei der Anwendung und Interpretation von Formeln eine relevante Rolle spielt (anteilig werden relativ viele Codings der Ebene VI zugeordnet). Dies trifft auf Frau Carle, Herrn Schmitt und Frau Müller zu. Bei diesen LehrerInnen wird in Tabelle 13.2 ein „+“ bei Alltagssprache notiert. Bei Herrn Schmitt und Frau Müller ist Ebene VI (Alltagssprache) die zweithäufigste Ebene. Bei vielen anderen LehrerInnen zählt die Ebene VI deutlich weniger Codings als die Ebenen IV (Fachsprache) und V (Unterrichtssprache). Hierzu zählen Frau Gerber, Herr Jasper, Herr Meyer und Herr Weber. Bei ihnen ist von einer moderaten Rolle der Alltagssprache auszugehen („0“ in Tabelle 13.2). Bei einer dritten Gruppe von LehrerInnen schließlich fällt diese Ebene zahlenmäßig sehr deutlich hinter die anderen verwendeten Ebenen (Frau Berger, Herr Funke, Herr Lenz). Bei ihnen wird daher in Tabelle 13.2 ein „-“ bei Alltagssprache notiert. Die LehrerInnen, die extrem selten Ebene VI verwenden, sind gleichzeitig die LehrerInnen, bei denen die Ebene IV (Fachsprache) deutlich gegenüber den anderen Ebenen überwiegt.

Sprechen von Formeln: Auch in der Häufigkeit, mit der Formeln geschrieben oder gesprochen werden (Ebenen I-III) zeigen sich Unterschiede zwischen den einzelnen LehrerInnen (vgl. Diagramme D.23 im Anhang). Im Vergleich der Häufigkeiten der Summe der Codings in Ebene I, IIA, IIB und III (entspricht der Kategorie *Formel wird*

³Bei ihnen ist die Ebene V die Ebene mit den zweitmeisten Codings. Die Differenz zur maximal ausgeprägten Ebene beträgt maximal 10% der Gesamtcodingzahl für die Lehrkraft. Bei Herrn Jasper handelt es sich nach dieser Regel um einen Grenzfall, die Ebene V würde rechnerisch eine codierte Textstelle mehr benötigen, um in diese Regel zu fallen. Da es sich hier aber um qualitative Analysen handelt, soll hier die prinzipielle zahlenmäßige Größenordnung ausreichen, um Herrn Jasper zusätzlich in diese Gruppe zu zählen.

gesprochen) und den Ebenen IV, V und VI (entspricht Kategorie *Formel wird angewendet oder interpretiert*) zeigt sich, dass es zum einen LehrerInnen gibt, bei denen die Anwendung oder Interpretation einer Formel in mindestens einer sprachlichen Varietät häufiger geschieht als das reine Sprechen von Formeln (mindestens eine der Ebenen IV, V oder VI weist einzeln wesentlich mehr Codings auf als die Summe der Codings der Ebenen I-III). Bei diesen LehrerInnen wird bei „Sprechen von Formeln“ in Tabelle 13.2 ein „-“ vermerkt. Auf der anderen Seite gibt es LehrerInnen, bei denen der Unterschied der Codings in den Ebenen I-III zur Ebene mit den meisten Codings nicht sehr groß ist (moderate Relevanz des Sprechens von Formeln ggü. anderen Ebenen, „0“) oder die Ebenen I-III mehr Codings zählen als die Ebenen V und VI (Herr Funke, Herr Jasper). Da bei ihnen die Formeln selbst im Vergleich zu den anderen Ebenen eine zahlenmäßig wichtige Rolle einnehmen, wird in Tabelle 13.2 ein „+“ vermerkt.

Reflektieren über Formeln: Alle LehrerInnen sprechen in relevanter Häufigkeit auf einer Meta-Ebene über Formeln (Meta-Ebene weist trotz insgesamt geringer Codingzahlen bei niemandem eine mit Abstand geringere Codinganzahl auf als die anderen Ebenen). Eine Ausnahme stellt hier Herr Lenz dar. Bei ihm ist die Anzahl der Codings in Ebene I (N=25) etwas höher als die der Meta-Ebene (N=21; vgl. Diagramme D.22 im Anhang, „-“ in Tab. 13.2). Es gibt jedoch einzelne LehrerInnen in der Stichprobe, bei denen die Meta-Ebene im Vergleich zu den anderen Ebenen eine deutlich relevantere Rolle einnimmt als dies bei den anderen LehrerInnen der Fall ist. Bei diesen LehrerInnen werden der Meta-Ebene mehr Codings zugeordnet als mindestens einer anderen Ebene (wobei bei diesem Vergleich die Ebenen I-III zusammengezählt werden) und in einer ähnlichen Größenordnung wie zwei weitere Ebenen. Diese Bedingungen treffen auf Frau Carle und Herrn Jasper zu („+“ in Tab. 13.2). Bei Herrn Funke, Frau Gerber, Herrn Meyer und Herrn Schmitt kann anhand der Codinghäufigkeiten von einer moderaten Rolle der Meta-Ebene ausgegangen werden („0“ in Tab. 13.2).⁴

Tabelle 13.2 zeigt eine Übersicht darüber, bei welchen LehrerInnen welche sprachlichen Ebenen wie ausgeprägt sind. Es wird deutlich, dass es sich bei den gefundenen Mustern nicht um sich ausschließende Gruppen handelt, sondern eine Lehrkraft auch zu mehreren Gruppen gehören kann. In der Tabelle ist bei LehrerInnen, bei denen die jeweilige Sprachform stark ausgeprägt ist, ein „+“ verzeichnet. Eine „0“ steht für eine moderate Ausprägung der jeweiligen Sprachform. In einigen Fällen werden außerdem

⁴Als Auswahlregel für die Gruppe der Formeln Reflektierenden („+“) wurde angesetzt, dass der Häufigkeitsunterschied zweier Ebenen zur Meta-Ebene nicht größer sein darf als +5% der Gesamtcodinganzahl der jeweiligen Lehrkraft. Bei der Gruppe von LehrerInnen mit moderater Relevanz der Meta-Ebene („0“) wurde angesetzt, dass diese Regel für eine Ebene gelten muss. Mindestens eine weitere Ebene darf nicht mehr Codings als die Codinganzahl der Meta-Ebene +10% der Gesamtcodinganzahl betragen.

	Fachsprache	Unterrichtssprache	Alltagssprache	Formeln sprechen	Formeln reflektieren
Frau Berger	+		–		
Frau Carle	0	0	+	0	+
Herr Funke	+		–	+	0
Frau Gerber		+	0		0
Herr Jasper	0	0	0	+	+
Herr Lenz	+		–		–
Herr Meyer	0	0	0	0	0
Frau Müller	0		+		
Herr Schmitt		+	+		0
Herr Weber		+	0		

Tabelle 13.2.: Ausprägung der Ebenengruppen bei einzelnen LehrerInnen

LehrerInnen ausgemacht, bei denen eine Sprachgruppe auffällig selten vorkommt. In diesem Fall ist an entsprechender Stelle in der Tabelle ein „–“ verzeichnet. Aus der Tabelle sind nun sehr gut einige Extremfälle der LehrerInnen zu erkennen:

- **Fachsprachliches Sprechen:** Frau Berger und Herr Lenz sind beide besonders ausgeprägte NutzerInnen der Fachsprache (Ebene IV). Bei Herrn Funke ist die Fachsprache zusätzlich mit einer besonderen Ausprägung als Formelsprecher kombiniert.
- **Schülernahes Sprechen:** Alltagssprache (Ebene VI) und Unterrichtssprache (Ebene V) sind häufig gleichzeitig in besonderer Weise ausgeprägt. Bestes Beispiel ist Herr Schmitt, aber auch bei Herrn Weber und Frau Gerber sind diese zwei Sprachgruppen gegenüber anderen stärker vertreten.
- **Ausgewogenes Sprechen:** Einige andere LehrerInnen zeichnen sich nicht durch die Verwendung einer vorrangigen Ebene aus oder nutzen unterschiedliche Ebenen in moderater Form: Frau Carle, Herr Jasper und Herr Meyer. Dies korreliert auch mit den recht breiten Coding-Häufigkeitsverteilungen der Ebenen in den

Diagrammen D.22 und D.23 im Anhang. Bei diesen drei LehrerInnen kommen somit alle Ebenen relativ häufig vor. Dies gilt sowohl im intrapersonellen Vergleich der Ebenen als auch im interpersonellen Vergleich der Ausprägung einzelner Ebenen als auch im interpersonellen Vergleich unterschiedlicher LehrerInnen.

- **Reflektierendes Sprechen** Bei Frau Carle und Herrn Jasper ist die Meta-Ebene im Vergleich zu den anderen Ebenen und LehrerInnen stärker ausgeprägt. Sie zeichnen sich somit durch viele Äußerungen aus, die eine Meta-Sicht auf einzelne Formeln und die Darstellungsform Formeln im Allgemeinen erkennen lassen.

Die Analyse der Ebenen zeigt somit insgesamt eine starke Fokussierung auf Fachsprache und Unterrichtssprache. Alltagssprachliche Kategorien sind in dieser Erhebung nur sehr marginal vertreten. Außerdem können sprachlich verschiedene Lehrertypen ausgemacht werden, bei denen sich Alltagssprache und Fachsprache häufig ausschließen und Fachsprache oft mit häufigem Sprechen von Formeln verbunden ist. Im Reflektieren über Formeln, also einer Vermittlung von Meta-Wissen über eine Formel (Kategorie *Über Formel wird gesprochen*) zeigen sich zwei LehrerInnen durch häufiges Sprechen *über* Formeln aus. Die Rolle von Meta-Informationen ist somit im Unterricht der hospitierten LehrerInnen als unterschiedlich relevant einzuschätzen.

14. Zusammenfassende Diskussion des Sprechens mit und über Formeln

Insgesamt zeigt das Kategoriensystem eine inhaltlich sehr breite Interpretation und Anwendung von Formeln durch die beobachteten LehrerInnen. Bezieht man sich auf die Theorie der semantischen Netzwerke (s. Kap. 3.3.2, Abb. 3.5), so scheinen die LehrerInnen zwar sehr viele Aspekte ihres semantischen Netzwerkes zu einer Formel anzusprechen, die Verknüpfung zur Formel selbst, also die Verbindungen und Wege des Netzwerkes, beschreiben sie aber in der Regel nicht näher. Dies führt dazu, dass für SchülerInnen der Zusammenhang zur Formel vermutlich nicht deutlich wird und davon auszugehen ist, dass SchülerInnen die meisten der aufgetauchten Kategorien nicht direkt mit einer Formel in Verbindung bringen.

Im Folgenden werden die Hauptergebnisse des Sprechens von Formeln (Oberkategorie *Formel wird gesprochen*, s. Kap. 14.1), der Anwendung und Interpretation von Formeln (Oberkategorie *Formel wird angewendet oder interpretiert*, s. Kap. 14.2) und des Sprechens über Formeln auf einer Meta-Ebene (Oberkategorie *Über Formel wird gesprochen*, s. Kap. 14.3) zusammengefasst. Anschließend erfolgt eine Gesamtauswertung der Ergebnisse (s. Kap. 14.4) und ein Rückbezug auf die in Abschnitt I dargestellten theoretischen Grundlagen in Form einer Analyse der angesprochenen Aspekte von Formelverständnis (s. Kap. 14.5) und der Nutzung von durch Lehavi *et al.* (2019) identifizierten Teaching Pattern (s. Kap. 14.6).

14.1. Wie sprechen LehrerInnen Formeln?

Die Ergebnisse dazu, wie LehrerInnen Formeln sprechen (Oberkategorie *Formel wird gesprochen*) zeigen, dass bereits bei der einfachen Verbalisierung von Formelzeichen eine große Variationsbreite herrscht. Inhaltlich drücken alle Aussagen zu einer Formel dasselbe aus: eine Notation oder Verbalisierung der Formel selbst. Die einzelnen Kategorien beziehungsweise Ebenen des Ebenenmodells unterscheiden sich in der Art der verwendeten sprachlichen Zeichen. Formeln tauchen in ihrer Grundform, in

umgestellter und in unvollständiger Form auf.¹

Mathematische Symbole werden unterschiedlich verbalisiert. So finden sich beispielsweise für das Symbol des Bruchstrichs ($\frac{a}{b}$) die verbalen Entsprechungen durch, geteilt durch, dividiert, dividiert durch, Quotient, Bruch und Verhältnis. Es überwiegen hier Unterrichtssprachliche Formulierungen („mal“ / „durch“). Auch Quotienten werden in unterschiedlichen Gruppen notiert und gesprochen ($\frac{R \cdot A}{\varrho}$, $\frac{R}{\varrho} \cdot A$), in der Regel ohne dass dies begründet oder die Äquivalenz verschiedener Ausdrücke explizit thematisiert wird. Dies trifft auch auf die mathematische Äquivalenz der Ausdrücke $I \sim U$ und $U \sim I$ zu, die im Folgenden noch näher diskutiert wird.

Betrachtet man die Häufigkeiten, so fällt zum einen auf, dass es keine wesentlichen Unterschiede zwischen dem beobachteten Unterricht des Gymnasiums und der Mittelschule gibt. In beiden Schulformen scheinen Formeln somit eine ähnlich relevante Rolle zu spielen. Grundsätzlich werden Formeln häufiger gesprochen als geschrieben, dies trifft bis auf eine Ausnahme auch für die einzelnen LehrerInnen zu. Die Verbalisierungen erfolgen häufiger mit Formelzeichen (Kategorie *Formelsatz mit FZ* / Ebene IIB: 188 Codings). Seltener werden die Formelzeichen beim Sprechen der Formeln in ihre zugehörigen Termini übertragen (Kategorie *Formelsatz mit Termini* / Ebene III: 123 Codings). Dieses Ergebnis ist bei dem längeren Widerstandsgesetz besonders deutlich. Hier scheinen LehrerInnen das Sprechen der Formeln durch Formelzeichen zu „vereinfachen“ und zu ökonomisieren, da Formelzeichen kürzer sind als ihre zugehörigen Termini. In Rückbezug auf die Funktion der kognitiven Entlastung (s. theoretische Betrachtungen in Kap. 2.1.2) kann dies durchaus sinnvoll sein. Es muss jedoch hinterfragt werden, ob dies für SchülerInnen den erhofften „Vorteil“ erbringt oder aufgrund der Unsicherheiten bei Zuordnungen von Formelzeichen und Termini zu zusätzlichen Verstehenshürden führt. Bei einer unsicheren Zuordnung von Formelzeichen und Termini kann die Verwendung der Formelzeichen anstelle der Termini für die Lernenden auch verständniserschwerend sein und sollte bewusst abgewogen werden. Hierauf deuten auch von Lernenden in anderen Untersuchungen geäußerte Schwierigkeiten der Zuordnung von Formelzeichen zu Termini (s. Kap. 3.3.5). Auch im hospitierten Unterricht zeigte sich, dass SchülerInnen die Zuordnungen von Formelzeichen und Termini nicht sicher beherrschen, wie der folgende Unterrichtsausschnitt in sehr ausgeprägter Weise zeigt:

Frau Gerber: „Spannung, noch mal das Formelzeichen!“

¹Die identifizierten Kategorien entsprechen den Ebenen I-III des Ebenenmodells (s. Kap. 5.4): Ebene I - *Formel* (s. Kap. 12.1.1), Ebene IIA - *Wortformel* (s. Kap. 12.1.2), Ebene IIB - *Formelsatz mit Formelzeichen* (s. Kap. 12.1.3) und Ebene III - *Formelsatz mit Termini* (s. Kap. 12.1.4). Die Kategorien sind deskriptive analytische Kategorien (s. Kap.9.2).

Anne: „A.“

Tom: „Das ist V.“

Max: „I.“

Frau Gerber: „Jetzt haben wir bald alles durch an Buchstaben. War noch kein richtiges mit dabei.“

Tobias: „U.“

Frau Gerber: „Genau. U.“ (KTH2, 90-96)

Grundsätzlich können die drei Kategorien *Formel*, *Wortformel*, *Formelsatz mit Formelzeichen* und *Formelsatz mit Termini* für alle drei betrachteten Formeln gefunden werden. In den identifizierten Unterkategorien tauchen einige Kategorien für das Ohmsche Gesetz nicht auf. Dies ist auf die Unterschiedlichkeit zwischen Gleichungen und algebraischen Ausdrücken, die keine Gleichungen sind, zurückzuführen. So macht es beispielsweise wenig Sinn, bei einer Proportionalität zweier Größen von einer umgestellten Form zu sprechen, insbesondere, da in dieser Stichprobe die Reihenfolge, in der die Proportionalität ausgedrückt wird, variiert (s.u.). Unterkategorien, die sich auf die Versprachlichung der Einheit beziehen, werden nur für die Definitionsformel identifiziert. Dies deutet darauf hin, dass diese Unterkategorien nur dann relevant sind, wenn durch eine Formel eine neue Einheit, die sich beispielsweise aus bekannten SI-Einheiten zusammensetzt, definiert und im Unterricht eingeführt wird.

Nur sehr selten wird eine Formel mit ihren Termini statt den Formelzeichen geschrieben (Kategorie *Wortformel* kommt nur bei 5 der 10 hospitierten LehrerInnen vor). Sie wird nur dann genutzt, wenn eine Formel neu eingeführt wird und dann an der Tafel notiert.

Sowohl die Lehrerin mit der maximalen Anzahl an gesprochenen oder geschriebenen Formeln (Kategorie *Formel wird gesprochen*), als auch der Lehrer mit der minimalen Anzahl sind MittelschullehrerInnen. Sie sind gleichzeitig auch die LehrerInnen mit der maximalen und minimalen Anzahl an mit *Rechnung* codierten Textstellen (vgl. Diagramme D.3 und D.8 im Anhang). Dies deutet darauf hin, dass LehrerInnen, bei denen Formeln häufig gesprochen werden, auch viele Rechnungen machen. Insbesondere bei an der Tafel vorgerechneten Aufgaben überrascht dies wenig, da hier die Formel sehr häufig während der Verbalisierung der Rechnung selbst gesprochen wird.

Im Folgenden sollen zwei Aspekte näher interpretiert werden: Das unvollständige Sprechen einer Formel und die Uneinigkeiten bezüglich der Reihenfolge beim Ohmschen Gesetz.

Es fällt auf, dass Formeln häufig nur unvollständig gesprochen werden, sodass die Größe, die auf der linken Seite des Gleichheitszeichens steht, nicht mitgesprochen wird. Man kann dies dahingehend interpretieren, dass die Formel in ihrer vollständigen Aussage vor dem Aspekt einer Berechnungsvorschrift in den Hintergrund tritt, da nur noch die Größen von Relevanz sind, die in den Taschenrechner eingetippt werden müssen. Diese Interpretation kann durch die Ergebnisse zu den Kategorien *Rechnung* und *Erkenntnistheoretische Klassifizierung der Formel* gestützt werden, da auch hier häufig eher technische Berechnungen ohne Kontext vorkommen und Formeln insbesondere als Berechnungsvorschriften klassifiziert werden (s. Abschnitt 12.2.1 und 12.3.4).

Das zweite auffällige Ergebnis ist die unterschiedliche Notation und Aussprache des Ohmschen Gesetzes ($I \sim U$ oder $U \sim I$), die bei vielen LehrerInnen auch intrapersonell variiert. Insgesamt wird das Ohmsche Gesetz in der Erhebung 64 mal geschrieben oder gesprochen. Davon 39 mal in der Richtung $I \sim U$ (61%) und 25 mal in der Richtung $U \sim I$ (39%). Physikalisch mehr Sinn macht die Formulierung, dass die Stromstärke direkt proportional zur Spannung ist, denn die Spannung ist in der Regel das, was wir an einem Experiment variieren können, und die Stromstärke ist die aus der anliegenden Spannung und dem vorliegenden Widerstand des Leiters oder des elektrischen Schaltkreises resultierende Größe. Die Tatsache, dass in 4 von 6 Fällen die physikalisch weniger sinnvolle Formulierung genutzt wird, kann dahingehend interpretiert werden, dass auch LehrerInnen diese physikalische Bedeutung des Ausdruckes häufig nicht mitdenken. Dies kann zum einen so gedeutet werden, dass die kognitive Entlastung durch die Mathematisierung dazu beiträgt, dass diese physikalische Bedeutung in den Hintergrund tritt und nicht immer explizit mitgedacht werden muss (s. Kap. 2.1.2). Auf der anderen Seite kann dies jedoch auch als Hinweis darauf gedeutet werden, dass die strukturelle Rolle der Mathematik (s. Kap. 2.1.3 und 3.2) auf diese Weise vernachlässigt wird, da die physikalische Bedeutung des algebraischen Ausdrucks ignoriert wird.²

14.2. Wie wenden LehrerInnen Formeln an und interpretieren diese?

Die Ergebnisse zur Interpretation und Anwendung von Formeln (Oberkategorien *Formel wird angewendet oder interpretiert*) zeigen, dass im Physikunterricht auf sehr vielfäl-

²Dieser Aspekt der Reihenfolge von Proportionalitäten wird in Kapitel 15.3 näher beschrieben und im Sinne einer technischen oder strukturellen Verwendung von Mathematik interpretiert.

tige Weise sprachlich mit Formeln umgegangen wird.³

Die Anwendungen und Interpretationen der Formeln unterscheiden sich insbesondere in der Ausprägung, in der sie mathematische oder physikalische Inhalte fokussieren. Auch wenn häufig beide Aspekte in einem strukturellen Sinne (n. Pietrocola (2008), s. Kap. 3.2) ineinandergreifen, lässt sich doch deutlich erkennen, dass oft entweder mathematische oder physikalische Inhalte stärker betont werden (nähere Analysen hierzu erfolgen in Kap. 15). Auffallend ist außerdem, dass die Formel häufig nur implizit mit Äußerungen verbunden ist, die den physikalischen Inhalt betonen.

Neben klassischen Rechnungen in unterschiedlichen Ausprägungen und mit unterschiedlich starker Kontextorientierung (s. Kap.12.2.1) wird auf verschiedene Weise beschrieben, wie sich Größen zueinander mathematisch verhalten (s. Kap. 12.2.5). Beide Arten von Aussagen sind sehr quantitativ orientiert, oft wird mit konkreten Werten gearbeitet. Auch bei Herleitungen von Formeln (Kategorie *Herleitung*, s. Kap. 12.2.2) ist ein deutlicher Fokus auf mathematischen Aspekten, da hier oftmals aus Proportionalitäten mathematisch auf die Formel geschlossen wird. Äußerungen, die die Einheiten der Größen beschreiben oder die Formel implizit als Messprinzip für eine Größe darstellen (Kategorien *Einheit* und *Messprinzip*) stellen den Bezug zur Physik sehr deutlich her, da hier die Formel explizit in einen physikalischen Kontext gesetzt wird. Noch stärker wird der physikalische Inhalt bei vielen Aussagen betont, die Anwendungen oder Experimente, Modelle oder Analogien beschreiben (Kategorien *Anwendung*, *Modell*, *Analogie* und *Größe*). Zum Teil tritt bei diesen Kategorien die mathematische Beziehung der Größen in den Hintergrund, oft wird dann auch die Formel nicht explizit mit den Aussagen verknüpft. Diese nur implizite Verbindung mit der Formel tritt insbesondere bei den Kategorien *Anwendung – genannt* (Unterkategorie zu *Anwendung oder Experiment*), *Analogie* und *Beschreibung einzelner Größen* auf.

Die Arten der Anwendungen und Interpretationen unterscheiden sich stark in der Häufigkeit, mit der sie auftreten. Ein deutlicher zahlenmäßiger Schwerpunkt liegt auf Kategorien mit starkem mathematischen Bezug (*Rechnung*, *Zusammenhang zwischen Größen*). Betrachtet man die Häufigkeitsverteilungen auf Ebene der einzelnen LehrerInnen, so zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Personen. Bei 5 LehrerInnen (Frau Berger, Frau Carle, Herrn Funke, Frau Gerber, Herrn Jasper) spiegelt die insgesamt Häufigkeitsverteilung relativ gut die individuelle wider: Formeln

³Die entsprechenden Kategorien sind zum Teil analytisch, zum Teil evaluativ (s. Kap.9.2) und beschreiben, wie im Unterricht mit Formeln gearbeitet wird oder welche Inhalte beschrieben werden, die mit der Formel zusammenhängen. Die von den LehrerInnen genutzten Kategorien sind: *Rechnung* (s. Kap. 12.2.1), *Herleitung der Formel* (s. Kap. 12.2.2), *Messprinzip* (s. Kap. 12.2.3), *Beschreibung der Einheit* (s. Kap. 12.2.4), *Zusammenhang der Größen* (s. Kap. 12.2.5), *Anwendung oder Experiment* (s. Kap. 12.2.6), *Beschreibung einzelner Größen* (s. Kap. 12.2.7), *Modell* (s. Kap. 12.2.8) und *Analogie* (s. Kap. 12.2.9).

werden vor allem angewendet und interpretiert, indem der mathematische Zusammenhang zwischen Größen beschrieben wird, einzelne Größen beschrieben werden und Rechnungen gemacht werden (häufigste Kategorien: *Zusammenhang zwischen Größen*, *Beschreibung einzelner Größen* und *Rechnung*). Bei Frau Berger und Herrn Jasper ist jeweils die vierthäufigste Kategorie *Anwendung*. Zwei LehrerInnen weisen eine recht homogene Häufigkeitsverteilung auf, bei der keine einzelne Kategorie so deutlich herausragt: Herr Meyer, Frau Müller und Herr Schmitt. Bei diesen scheint das Sprechen über Formeln somit inhaltlich sehr breit aufgestellt zu sein.

Bis auf drei Kategorien kommen alle anderen Kategorien bei allen beobachteten LehrerInnen vor. Dies zeigt, dass bei allen LehrerInnen Formeln auf sehr vielfältige Weise angewendet oder interpretiert werden und die unterschiedlichen identifizierten Arten der Anwendung und Interpretation im Unterricht fast aller hospitierter LehrerInnen eine Rolle spielen. Die Kategorie *Herleitung* und *Analogie* kommen jeweils nur bei 7 der 10 LehrerInnen vor, die Kategorie *Beschreibung der Einheit* kommt nur bei 3 der 10 LehrerInnen vor. Insbesondere diese letzte Kategorie spielt somit insgesamt im Unterricht eine eher untergeordnete Rolle, sie wird nur von sehr wenigen LehrerInnen genutzt.

14.3. Wie sprechen LehrerInnen über Formeln?

LehrerInnen machen in dieser Erhebung auf unterschiedliche Weise Aussagen, die eine übergeordnete Sichtweise auf Formeln im Allgemeinen oder die jeweilige Formel im Speziellen erkennen lassen (Oberkategorie *Über Formel wird gesprochen*, Kap. 9.2).⁴

Viele der Aussagen bleiben implizit. In der Regel machen die LehrerInnen keine expliziten Aussagen, um SchülerInnen etwas über die Darstellungsform Formel zu erzählen, vielmehr werden beiläufig Äußerungen gemacht, die eine übergeordnete Sichtweise erkennen lassen. So wird beispielsweise nicht explizit gesagt: „Die Formel ist ein Mittel, um etwas ausrechnen zu können.“ Stattdessen findet sich die Formulierung: „Die BERECHNUNGSGLEICHUNG für den Widerstand lautet: R ist gleich U durch I !“ (EPR8, 26). Das Lernen über die Darstellungsform Formel findet somit vorrangig implizit statt, nicht explizit, wie es aufgrund der theoretischen Überlegungen zum Lernen über Repräsentationen (s. Kap. 3.1) und auch der Erkenntnisse zum Fachsprachenlernen und einem geforderten Metadiskurs (s. Kap. 4.4.3) auch für das

⁴Bei den in dieser Oberkategorie identifizierten Kategorien handelt es sich um sehr stark ausgeprägt analytische Kategorien (s. Kap.). Die in dieser Erhebung gebildeten Kategorien sind: *Wichtigkeit oder Vorteile der Formel* (s. Kap. 12.3.1), *Gültigkeitsbedingungen der Formel* (s. Kap. 12.3.2), *Anwendungsbereich der Formel* (s. Kap. 12.3.3), *Erkenntnistheoretische Klassifizierung der Formel* (s. Kap. 12.3.4), *Vergleich von Experiment und Theorie* (s. Kap. 12.3.5), *Analogie zu anderen Formeln* (s. Kap. 12.3.6), *Merkhilfen* (s. Kap. 12.3.7) und *Metareflexion über Sprache* (s. Kap. 12.3.8).

Lernen von und über Formeln sinnvoll und vermutlich auch notwendig wäre.

Die LehrerInnen nennen unterschiedliche Vorteile von Formeln, die erkennen lassen, dass sie Formeln in der Physik als etwas Wichtiges empfinden: Formeln sind (inhaltlich) wichtig, mit Formeln kann man etwas Bestimmtes tun (etwas berechnen) und Formeln sind genau. Neben diesen Aspekten werden aber auch einige sehr unterrichtspragmatische Vorteile genannt: Formeln muss man sich merken und sie sind für Prüfungen wichtig und stellen dort eine einfache Möglichkeit dar, Punkte zu erhalten (Kategorie *Wichtigkeit / Vorteile*, s. Kap. 12.3.1).

Über den Anwendungsbereich einer Formel wird häufig kontrastiv gesprochen, indem verglichen wird, wann die Formel $R = \frac{U}{I}$ und wann das Widerstandsgesetz $R = \rho \cdot \frac{l}{A}$ benutzt wird. Dabei wird häufig unterschieden zwischen der Berechnung mittels experimenteller Werte mit der Definitionsformel und einer theoretischen Betrachtung, beispielsweise zum Planen eines Experimentes mittels des Widerstandsgesetzes (Kategorie *Anwendungsbereich*, s. Kap. 12.3.3).

Viele Kategorien tauchen vorrangig nur für eine Formel auf, sodass insbesondere auf dieser Ebene des Sprechens über eine Formel Unterschiede zwischen den einzelnen Formeln deutlich zu werden scheinen. Auffällig ist außerdem, dass es häufig nicht die Definitionsformel ist, auf die die meisten Codierungen in einer Kategorie fallen.⁵ Im Sprechen von Formeln und den Anwendungen und Interpretationen von Formeln (Oberkategorien *Formel wird gesprochen* und *Formel wird angewendet oder interpretiert*) macht die Definitionsformel hingegen fast immer die meisten Codings aus, da ihr im Unterricht viel Zeit, Raum und Relevanz eingeräumt wird.

Das Sprechen über Anwendungsbereiche einer Formel hat für das Widerstandsgesetz eine besondere Relevanz (Kategorie *Anwendungsbereich*). Analogien zu anderen Formeln, die Vermittlung von Merkhilfen und die Metareflexion über sprachliche Besonderheiten von Begriffen, die durch die Formel definiert werden, tauchen vorrangig für die Definitionsformel $R = \frac{U}{I}$ auf (Kategorien *Analogie*, *Merkhilfe* und *Metareflexion über Sprache*). Dies ist zum einen darauf zurückzuführen, dass sich insbesondere in dieser Meta-Ebene wahrgenommene Unterschiede zwischen den einzelnen Formeln und der Art ihrer Aussage explizit oder implizit äußern. Zum anderen könnte es sein, dass diese Kategorien nur für jeweils eine Formel relevant sind. Aus diesem Grund müssten die Kategorien an weiteren, erkenntnistheoretisch ähnlichen Formeln noch einmal überprüft und validiert werden, um ihre Gültigkeit für Formeln im Allgemeinen feststellen zu können. In Kapitel 12.3.4 wurden die Ergebnisse der Kategorie

⁵Vorteile und Anwendungsbereich werden v. a. für das Widerstandsgesetz, Gültigkeitsbedingungen v. a. für das Ohmsche Gesetz angesprochen, ein Vergleich von Experiment und Theorie erfolgt bei Widerstandsgesetz und Definitionsformel in etwa gleich oft (vgl. Diagramm 12.27).

Erkenntnistheoretische Klassifizierung der Formel zusammengefasst (s. auch Abb. 12.32). Diese zeigen besonders deutlich Unterschiede zwischen den Formeln und könnten Grundlage für weitere Unterschiede sein, die LehrerInnen in der Handhabung unterschiedlicher Formeln mit verschiedenen Aussagearten machen.

14.4. Zusammenfassende Analyse: Wie sprechen LehrerInnen mit und über Formeln?

Die Ergebnisse zeigen ein inhaltlich sehr breites Bild vom Sprechen von und über Formeln. Das Kategoriensystem funktioniert als Beschreibungs- und Analyseinstrument dieses Sprechens. Es kann gut erfasst werden, wie LehrerInnen mit und über Formeln sprechen, was sich im Vorkommen der Kategorien für unterschiedliche Formeln und LehrerInnen zeigt.

Eine genauere Analyse, welche Kategorien bei welchen LehrerInnen und für welche Formeln vorkommen, zeigt, dass 10 der 21 Kategorien bei allen 10 LehrerInnen identifiziert werden können. Diese Kategorien sind somit bei allen LehrerInnen dieser Erhebung relevant und es ist davon auszugehen, dass sie eine sehr gute Übertragbarkeit auch auf den Unterricht anderer LehrerInnen besitzen und diese Art des Sprechens mit und über Formeln im Unterricht verbreitet ist. Nur 4 Kategorien werden bei weniger als 7 LehrerInnen identifiziert. Die Kategorie, die von den wenigsten LehrerInnen in dieser Erhebung genutzt wird, ist die *Beschreibung der Einheit*. Diese taucht nur bei 3 der hospitierten LehrerInnen auf (s. Tab. 14.1 und 13.2).

Alle LehrerInnen zeigen eine relativ große inhaltliche Breite beim Sprechen mit und über Formeln, was die Anzahl der verwendeten Kategorien widerspiegelt. Diese variiert bei den LehrerInnen zwischen minimal 15 und maximal 20 Kategorien. Bei keiner Lehrperson wurden alle 21 Kategorien codiert (s. Tab. 14.2).

Im Folgenden sollen zusammenfassend einige Unterschiede und Zusammenhänge zwischen einzelnen Kategorien und die Häufigkeiten der Ebenen dargestellt werden. Aus den Tabellen 14.1 und 14.2 sind einige Unterschiede zwischen den Formeln gut erkennbar. So nutzten alle 10 LehrerInnen die Kategorien *Formelsatz* und *Messprinzip* und viele die Kategorien *Metareflexion über Sprache* und *Merkhilfe* für die Definitionsformel, während diese Kategorien für das Widerstandsgesetz nur von sehr wenigen beziehungsweise keinen LehrerInnen genutzt wurden. Umgekehrt haben die Kategorien *Herleitung*, *Gültigkeitsbedingungen* und *Anwendungsbereich* für das Widerstandsgesetz eine wesentlich größere Relevanz als für die Definitionsformel. Auch in den Unterkategorien finden sich einige Unterschiede. So tauchen viele der Unterkategorien von

Zusammenhang zwischen den Größen vor allem für das Widerstandsgesetz auf, die Unterkategorien *Rechnung mit experimentellen Werten* und *Anwendungsaufgabe* kommen wesentlich häufiger für die Definitionsformel vor (s. Tabellen D.11 und D.12 im Anhang).

Einige Kategorien korrelieren inhaltlich miteinander. So wird beispielsweise das Widerstandsgesetz oft hergeleitet (Kategorie *Herleitung*), gleichzeitig wird dieses in der Kategorie *Erkenntnistheoretische Klassifizierung* als empirisches Gesetz bezeichnet. Die Definitionsformel $R = \frac{U}{I}$ wird nur von einem Lehrer hergeleitet, alle anderen LehrerInnen geben die Formel deduktiv vor, sie wird zu Beginn der Unterrichtseinheit eingeführt, indem sie an die Tafel geschrieben wird. Gleichzeitig wird diese Formel oft als Definition, nur von einer Lehrerin als empirisches Gesetz bezeichnet. Diese erkenntnistheoretischen Klassifizierungen von Formeln finden sich auch in den Verbalisierungen der Formeln wieder (s. Kap. 12.1.4). Hier existieren aktive Formulierungen, die das Handeln mit der Formel in den Vordergrund stellen (etwas wird berechnet, indem... oder Versprachlichung eines Bruches durch das Verb dividieren). Diese Formulierungen betonen somit ebenfalls den Charakter einer Berechnungsformel. Andere Formulierungen klassifizieren eine Formel implizit als Definition („Das Verhältnis aus Spannung und Stromstärke wird el. [sic] Widerstand genannt“, KPR3, TB). Auch die im vorherigen Abschnitt beschriebenen Unterschiede in der Verwendung der Kategorien deuten darauf hin, dass LehrerInnen unterschiedliche (erkenntnistheoretische) Arten von Formeln unterschiedlich behandeln. Zusammengefasst lässt sich über die Unterschiede zwischen Definitionsformel, Widerstandsgesetz und Ohmschen Gesetz sagen:

- Die Definitionsformel $R = \frac{U}{I}$ wird nicht hergeleitet. Sie wird als indirektes Messprinzip für den Widerstand beschrieben. Für diese Formel werden Merkhilfen vermittelt und sprachliche Besonderheiten der Größe, die sie definiert, werden reflektiert. Sie wird in zahlreichen unterschiedlichen Rechnungen angewendet, die oft auch die Rechnung mit experimentellen Werten und Anwendungsaufgaben beinhalten.
- Das Widerstandsgesetz wird aus experimentellen Daten und Proportionalitäten hergeleitet und als empirisches Gesetz bezeichnet. Der Zusammenhang zwischen den einzelnen Größen spielt eine große Rolle und er wird auf vielfältige Weise beschrieben und analysiert. Gültigkeitsbedingungen und Anwendungsbereich des Widerstandsgesetzes werden im Unterricht besprochen. Bei Rechenaufgaben überwiegen Aufgaben ohne Kontextbezug. Als relativ lange Formel wird sie sehr selten vollständig als Formelsatz verbalisiert.

- Das Ohmsche Gesetz nimmt als Proportionalität eine Sonderrolle ein. Insgesamt fallen nur wenige Textstellen auf diesen Ausdruck (13%, s. Diagramm 12.1), wodurch besondere Ausprägungen in den Kategorien weniger deutlich zu erkennen sind. Es wird ebenfalls häufig aus Experimenten hergeleitet und als empirisches Gesetz bezeichnet. Da es sich um den Ausdruck einer Proportionalität handelt, wird wesentlich weniger mit dem Ohmschen Gesetz gerechnet als mit den anderen Formeln, es werden jedoch über den proportionalen Zusammenhang Werte ermittelt und überprüft. Diese Überprüfung von Werten findet häufig auch graphisch statt. Als kurzer Ausdruck wird es oft auch als Formelsatz mit Termini gesprochen, insgesamt wird es häufiger gesprochen als geschrieben.

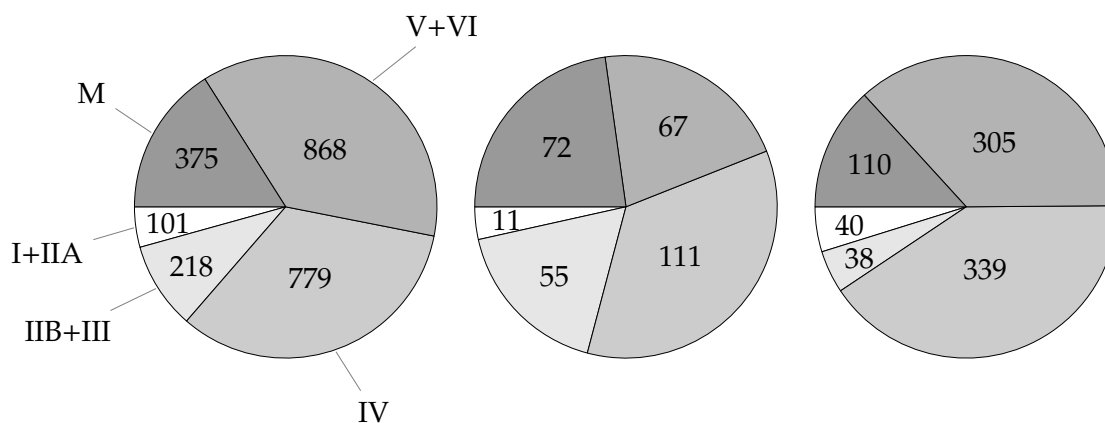


Abbildung 14.1.: **RUI** **OG** **WG**
 Verteilung der Codings auf die Ebenen von links nach rechts für die Definitionsformel ($N = 1337$), das Ohmsche Gesetz ($N = 316$) und das Widerstandsgesetz ($N = 837$)
 I...Formel, IIA...Wortformel, IIB Formelsatz mit Formelzeichen, III...Formelsatz mit Termini, IV...Anwendung oder Interpretation in Fachsprache, V...in Unterrichtssprache, VI...in Alltagssprache, M...Meta-Ebene

Die Häufigkeiten, in der die unterschiedlichen Ebenen des Ebenenmodells und damit unterschiedliche sprachliche Varietäten verwendet werden, ist bei den drei betrachteten Formeln leicht unterschiedlich (s. Diagramm 14.1). Die Definitionsformel und insbesondere das Ohmsche Gesetz werden häufiger gesprochen (IIB+III) als geschrieben (I+IIA). Das Widerstandsgesetz wird etwa gleich oft geschrieben und gesprochen. Dies kann an der Länge der Formel liegen, die ein Sprechen der gesamten Formel unhandlich macht. Die Anteile der Meta-Ebene sind bei allen drei Formeln in etwa gleich

groß, etwas mehr Anteil nimmt sie im hospitierten Unterricht für das Ohmsche Gesetz ein. Deutlichere Unterschiede sind wiederum bei den Anteilen der Anwendungen und Interpretationen in Fachsprache (IV) gegenüber denen in Unterrichtssprache und Alltagssprache (V+VI) zu erkennen. Für die Definitionsformel überwiegen leicht die Äußerungen in Unterrichts- und Alltagssprache. Beim Ohmschen Gesetz ist deutlich zu erkennen, dass Äußerungen in Fachsprache überwiegen, beim Widerstandsgesetz werden etwas mehr fachsprachliche als unterrichts- und alltagssprachliche Äußerungen gemacht. Eine mögliche Erklärung wäre die unterschiedliche Aussageart der Formeln. Die Formel $R = \frac{U}{I}$ definiert die Größe des elektrischen Widerstands. Daher spielt bei dieser Formel die Begriffsbildung eine größere Rolle als bei den anderen Formeln. Die besondere Relevanz der Alltagssprache für die Begriffsbildung als Teil der physikalischen Fachsprache betonen beispielsweise Muckenfuß (1995) und Wagenschein (1988) (s. Kap. 4.2.3).

14.5. Aspekte von Formelverständnis in Theorie und Praxis

In Kapitel 6 wurde aus der Theorie zusammengefasst und abgeleitet, was in dieser Arbeit unter Formelverständnis verstanden wird. Im Folgenden soll nun dargestellt werden, welche Aspekte von Formelverständnis von den an dieser Erhebung beteiligten 10 LehrerInnen angesprochen werden und sich in den Kategorien wiederfinden. Die Ergebnisse werden in Tabelle 14.3 zusammengefasst. Für eine nähere Beschreibung, wie LehrerInnen den jeweiligen Aspekt des Formelverständnisses ansprechen, wird auf die jeweilige Beschreibung der Kategorie verwiesen. Die kursiv gedruckten Kategorien spiegeln den jeweiligen Aspekt des Formelverständnisses nur implizit oder am Rande wider.

Die Zahl in der letzten Spalte der Tabelle 14.3 gibt an, bei wie vielen LehrerInnen die jeweilige Kategorie auftaucht. Aus diesen Zahlen ist deutlich zu erkennen, dass nur drei Aspekte des Formelverständnisses von keinen LehrerInnen angesprochen werden: Kein Lehrender in der Erhebung bespricht einzelne mathematische Terme einer Formel. Dies kann durchaus auch auf die recht einfache Struktur der vorkommenden Formeln zurückzuführen sein, bei der sich eine Zerlegung in Einzelterme nur begrenzt anbietet. In höheren Klassenstufen und bei der Behandlung komplexerer Formeln könnte sich hier eventuell ein anderes Bild zeigen. Außerdem werden in der Erhebung keine Aussagen identifiziert, die einen inhaltlichen Bezug zu anderen Formeln herstellen. Auch dies kann auf die, der Klassenstufe geschuldete, geringe Anzahl anderer zur Verfügung stehender Formeln, auf die man sich beziehen könnte,

zurückgeführt werden. Allerdings würde sich eine inhaltliche Verknüpfung zwischen der Definitionsformel $R = \frac{U}{I}$ und dem Widerstandsgesetz $R = \rho \cdot \frac{l}{A}$ durchaus anbieten. Dies geschieht jedoch nicht explizit. In sehr wenigen Fällen berühren Aussagen zum Anwendungsbereich der Formel eine solche Verknüpfung (s. Kap. 12.3.3). Dies ist jedoch vernachlässigbar. Weitere Punkte werden nur von sehr wenigen LehrerInnen (weniger als 7) angesprochen: Extrem- und Spezialfälle sprechen nur 5 LehrerInnen an, zum Teil geschieht dies zudem nur implizit (s. Kap. 12.2.5). Der strukturelle Bezug zu anderen Formeln aufgrund mathematischer Ähnlichkeiten wird nur von 4 LehrerInnen angesprochen. Wie oben bereits beschrieben, ist es auch hier möglich, dass dieser Aspekt in höheren Klassenstufen stärker zum Tragen kommt, wenn mehr Formeln im Repertoire der SchülerInnen zur Verfügung stehen. Außerdem findet sich im Kategoriensystem keine Verknüpfung zu anderen Darstellungsformen. Dies ist jedoch eher dem Kategoriensystem und der dieser Arbeit zugrunde liegenden Fragestellung geschuldet als dem tatsächlichen Unterrichtshandeln der LehrerInnen. Da der Fokus dieser Arbeit auf der Verknüpfung algebraischer und verbalsprachlicher Darstellungen liegt, werden andere Darstellungsformen nur am Rande und nicht systematisch berücksichtigt.

Aspekt Formelverständnis	Kategorie	N _{Lehrer}
Bedeutung Formelzeichen	Wortformel (12.1.2)	(7/10)
	Formelsatz m. Termini (12.1.4)	(10/10)
math. Grundkompetenzen	Rechnung (12.2.1)	(10/10)
	Rechnung - Formel umstellen (12.2.1)	(8/10)
math. Struktur: Verhalten	Zshg. zw. Größen (12.2.5)	(10/10)
math. Struktur: Extrem- und Spezialfälle	Zshg. zw. Größen - Spezial-/Grenzfälle (12.2.5)	(5/10)
math. Struktur: einzelne Terme	★	(0/10)
math. Grundvorstellungen	Formelsatz m. FZ. (12.1.3)	(10/10)
phys. Hintergrund: Größen	Beschr. einzelner Größen (12.2.7)	(10/10)
	Metareflexion Sprache (12.3.8)	(8/10)
phys. Hintergrund: Konzepte, Prinzipien, Theorie	Anwendungsbereich (12.3.3)	(7/10)
Bedeutung Gleichheitszeichen	Formelsatz m. Termini (12.1.4)	(10/10)
Einheitenbetrachtung	Formel - Einheit (12.1.1)	(8/10)

Aspekt Formelverständnis	Kategorie	N _{Lehrer}
	Formelsatz m. FZ - Einheit (12.1.3)	(1/10)
	Formelsatz m. Termini - Einheit (12.1.4)	(9/10)
	Beschreibung Einheit (12.2.4)	(3/10)
epistemologische Überlegungen	Klassifizierung (12.3.4)	(10/10)
Herleitung der Formel	Herleitung (12.2.2)	(7/10)
Anw.b.: Gültigkeitsbereich	Gültigkeitsbedingungen (12.3.2)	(9/10)
Anw.b.: Näherungen, Idealisierungen	Vergleich Exp. / Theo. (12.3.5)	(8/10)
Bezug andere Formel: Inhalt	★	(0/10)
Bezug andere Formeln: Struktur	Analogie andere Formel (12.3.6)	(4/10)
Verknüpfung andere Darstellungsform	★ ⁶	(0/10)
Verknüpfung Alltag / Experiment	Messprinzip (12.2.3)	(10/10)
	Anwendung / Exp. (12.2.6)	(10/10)
Erklärung m. alltagsnahen Analogien	Modell (12.2.8)	(10/10)
	Analogie (12.2.9)	(8/10)

Tabelle 14.3.: Aus der Theorie abgeleitete Aspekte von Formelverständnis und zugehörige in der Erhebung identifizierte Kategorien

Folgende Kategorien werden von LehrerInnen zusätzlich angesprochen, sie finden sich nicht in den theoretischen Betrachtungen zum Formelverständnis wieder: *Wichtigkeit oder Vorteile der Formel* sowie *Merkhilfen*. Beide können in den Bereich des Wissens über eine Darstellungsform („metarepresentational competence“, s. Kap. 3.1) eingeordnet werden.

Die Bedeutung des Gleichheitszeichens wird in dieser Erhebung nur implizit thematisiert. Die von LehrerInnen bei der Verbalisierung von Formeln (Ebenen IIB und III) verwendeten verbalen Entsprechungen sind: ist, ist gleich, gleich, ist das gleiche wie, ist dasselbe wie. Außerdem wurden aktive Formulierungen genutzt, die den algebraischen Ausdruck als Handlungsaufforderung interpretieren und weniger die eigene

⁶Dieser Aspekt wird in der Datenanalyse nur am Rande betrachtet. Im Grunde handelt es sich bei der Verknüpfung der algebraischen Darstellung der Formel mit einer verbalen Entsprechung immer um eine Verknüpfung mit anderen Darstellungsformen. In einigen Fällen werden die Formel $R = \frac{U}{I}$ und das Ohmsche Gesetz außerdem mit Diagrammen verknüpft. Dies wird im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht weiter untersucht und daher auch nicht vom Kategoriensystem abgedeckt.

Semantik des Ausdruckes betonen („Wenn wir den Widerstand suchen, (...) rechnen wir Spannung durch Stromstärke“, HBG2, 24) (s. Kap. 12.1.4). Diese Verbalisierungen entsprechen der aus der Mathematikdidaktik bekannten Schwierigkeit von SchülerInnen eines Konzeptwechsels bei der Interpretation algebraischer Ausdrücke von einer arithmetisch zu verstehenden Handlungsanweisung hin zu einer eigenen Semantik (s. Kap. 3.3.2). Häufig werden die Formeln außerdem nur unvollständig gesprochen, in diesem Fall wird das Gleichheitszeichen gar nicht verbalisiert.

Insgesamt sprechen LehrerInnen in dieser Erhebung somit sehr viele Aspekte von Formelverständnis an, vieles bleibt jedoch nur implizit mit der Formel verknüpft.

14.6. Praktische Anwendungen von Teaching Pattern zur Vermittlung von Formelverständnis

Neben den Aspekten des Formelverständnisses wurden in der Theorie durch Interviews identifizierte Teaching Pattern zur Vermittlung von Formelverständnis beschrieben (s. Kap. 3.3.3). Lehavi *et al.* (2019) beschreiben die Pattern Exploration, Construction, Broadening und Application. Auch diese Pattern können in unterschiedlichem Maß durch die Kategorien abgebildet werden. Dies zeigt, dass LehrerInnen diese Pattern nicht nur theoretisch beschreiben, sondern sie auch im regulären Unterricht zum Tragen kommen. Die Pattern werden durch folgende Kategorien abgebildet:

- Exploration-Pattern: *Zusammenhang zwischen Größen* (s. Kap. 12.2.5) - Das Verhalten der Größen wird beschrieben, Extrem- und Spezialfälle werden analysiert. *Gültigkeitsbedingungen* (s. Kap. 12.3.2), *Anwendungsbereich* (s. Kap. 12.3.3) - Gültigkeits- und Anwendungsbereiche der Formel werden zwar nicht explizit untersucht, aber zumindest genannt und beschrieben.
- Construction-Pattern: *Herleitung* (s. Kap. 12.2.2) - Die Formel wird aus experimentellen Daten hergeleitet.
- Broadening-Pattern: *Analogie andere Formel* (s. Kap. 12.3.6) - Dieses Pattern tritt nur bei sehr wenigen LehrerInnen und in geringen Aspekten des Pattern auf. Ähnlichkeiten zwischen Formeln werden zwar angesprochen, jedoch wird nicht oder nur in sehr geringem Maß von dieser Ähnlichkeit heraus auf allgemeingültige Prinzipien der Physik geschlossen. Teilweise kommt dieses Pattern auch bei anderen Kategorien der übergeordneten Kategorie *Über die Formel wird gesprochen* zum Tragen. So werden übergeordnete Sichtweisen über Formeln insbesondere durch die *Klassifizierung* der Formel (s. Kap. 12.3.4), durch die Beschreibung der

Wichtigkeit und Vorteile der Formel (s. Kap. 12.3.1) und implizit auch beim *Vergleich von Experiment und Theorie* (s. Kap. 12.3.5) vermittelt.

- Application-Pattern: *Rechnung* (s. Kap.12.2.1) - Die Formel wird in verschiedenen Rechenaufgaben angewendet.

Somit lassen sich viele Aspekte der Theorie im analysierten Unterricht wiederfinden: LehrerInnen sprechen vielfältige Aspekte von Formelverständnis an und nutzen auch die von Lehavi *et al.* (2019) identifizierten Pattern.

Kategorie	LehrerIn	Jasper	Lenz	Funk	Schmitt	Berger	Müller	Meyer	Weber	Gerber	Carle	RUI	WG	OG	Σ
Formel wird gesprochen															
Formel		XXX	XX0	XXX	XXX	XX0	XXX	XXX	X0X	X0X	XXX	10	8	8	10
Wortformel		000	X00	000	000	000	XX0	X00	000	X0X	XX0	5	2	1	6
Formelsatz m. FZ		XXX	X00	XX0	XXX	X0X	XXX	XX0	X0X	X0X	XXX	10	6	7	10
Formelsatz m. Termini		X0X	X0X	X0X	X0X	X0X	XXX	X0X	X0X	X0X	XXX	10	2	10	10
Formel wird angewendet															
Rechnung		XX0	XX0	XX0	XX0	XXX	XXX	XXX	XX0	X0X	XXX	10	9	5	10
Anw. / Exp.		XXX	XX0	XX0	XXX	XXX	XXX	XX0	XXX	XXX	XXX	10	10	7	10
Messprinzip		X00	X00	X00	X00	X00	XX0	XX0	X00	X00	X00	10	2	0	10
Beschreibung Einheit		000	000	000	X00	000	X00	000	000	X00	000	3	0	0	3
Herleitung		0X0	000	0X0	0X0	00X	0X0	XX0	000	000	0XX	1	6	2	7
Zshg. zw. Größen		XXX	XXX	XX0	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	10	10	9	10
Beschr. Größen		XX0	XX0	XX0	XX0	XX0	XX0	XXX	XX0	XX0	XX0	10	10	1	10
Modell		XX0	XX0	X00	XXX	XX0	XXX	XX0	XX0	XX0	XX0	10	9	2	10
Analogie		X00	X00	000	XX0	000	XX0	0X0	X00	XX0	X00	7	4	0	8

Tabelle 14.1.: Vorkommen der Kategorien bei LehrerInnen und Formeln - Teil 1

X...Kategorie taucht auf, 0...Kategorie taucht nicht auf
das erste Zeichen steht jeweils für die Definitionsformel (RUI), das zweite für das Widerstandsgesetz (WG), das dritte für das Ohmsche Gesetz (OG)

Kategorie	LehrerIn	Jasper	Lenz	Funke	Schmitt	Berger	Müller	Meyer	Weber	Gerber	Carle	RUI	WG	OG	Σ
Über Formel wird gesprochen															
Klassifizierung		XXX	XX0	XX0	XXX	XXX	XXX	XXX	X0X	X0X	XXX	10	8	8	10
Meta: Sprache		000	000	X00	X00	X00	X00	X00	X00	X00	XX0	8	1	0	8
Wichtigkeit		XX0	XX0	0X0	0XX	XXX	XXX	XX0	XX0	000	XXX	7	9	5	9
Merkhilfe		X00	000	X00	000	000	X00	000	000	X00	000	4	0	0	4
Analogie andere Formel		000	X00	000	X00	000	000	X00	000	000	X00	4	4	0	4
Vgl. Exp.-Theorie		X0X	000	X00	0X0	X00	X0X	0X0	0X0	000	XXX	5	4	3	8
Gültigk.b.		XXX	000	00X	XXX	0XX	00X	00X	0XX	00X	0XX	2	5	9	9
Anwendungsbereich		XX0	XX0	0X0	0X0	000	0X0	0X0	000	000	0X0	2	7	0	7
Σ		17	15	17	19	15	20	19	15	16	19	21	19	14	14

Tabelle 14.2.: Vorkommen der Kategorien bei LehrerInnen und Formeln - Teil 2

X...Kategorie taucht auf, 0...Kategorie taucht nicht auf
das erste Zeichen steht jeweils für die Definitionsformel (RUI), das zweite für das Widerstandsgesetz (WG), das dritte für das Ohmsche Gesetz (OG)

15. Hinweise auf technischen oder strukturellen Umgang mit Mathematik beim Sprechen mit und über Formeln

Mathematik kann im Physikunterricht auf strukturelle oder technische Weise gehandhabt werden (vgl. Pietrocola, 2008). Diese strukturelle oder technische Rolle, die Mathematik damit im Physikunterricht spielt, wurde in Kapitel 3.2 ausführlich beschrieben. Folgend sollen nun Auffälligkeiten in den untersuchten Daten dargestellt werden, die auf einen eher technischen oder eher strukturellen Umgang mit Mathematik im beobachteten Unterricht schließen lassen. Ein technischer Umgang zeigt sich in einem Fokus auf das mathematische Handwerkszeug, häufig ohne Berücksichtigung physikalischer Bedeutungen und Inhalte. Ein struktureller Umgang findet unter Einbezug physikalischer Inhalte und mit Berücksichtigung physikspezifischer Bedeutungen mathematischer Ausdrücke statt.

Grundsätzlich gibt es einige sprachliche Handlungen, deren inhaltlicher Schwerpunkt stärker auf mathematischen Prozessen und Inhalten liegt als auf physikalischen Interpretationen. Hierzu zählen Rechnungen, die Beschreibung mathematischer Zusammenhänge der in der Formel vorkommenden Größen und Herleitungen von Formeln (Kategorien *Rechnung*, *Zusammenhang zwischen Größen*, *Herleitung der Formel*).

Die Beschreibungen von Anwendungen oder Experimenten, physikalischen Bedeutungen einzelner Größen, Modelle oder Analogien hingegen legen einen deutlichen Fokus auf nicht-mathematische Inhalte und physikalische Modelle (Kategorien *Anwendung oder Experiment*, *Beschreibung einzelner Größen*, *Modell* und *Analogie*). Bei diesen kann jedoch auch nur in Ausnahmefällen von einer Stärkung der strukturellen Rolle der Mathematik ausgegangen werden, da hier der mathematische Zusammenhang selbst (die Formel) meist nur implizit zugrunde liegt und die Verknüpfung dieser Inhalte mit der Formel nicht explizit ausgeführt wird. Eine besondere Rolle nimmt auch die Vermittlung von Merkhilfen (Kategorie *Merkhilfen*) ein. Diese werden im beobachteten Unterricht als inhaltsleeres, rein technisches Werkzeug vermittelt, das auch mathematische Inhalte ausblendet. Damit wird die strukturelle Rolle der Mathematik

für die Physik bei dieser Kategorie nicht berücksichtigt, aber auch kein mathematisches relationales Verständnis nach Skemp (1976) (s. Kap. 3.2) vermittelt.

Insbesondere auch die erkenntnistheoretische Klassifizierung einer Formel als Formel zur Berechnung betont den Werkzeugcharakter einer Formel und ist in dieser Erhebung die am häufigsten und von den meisten LehrerInnen beschriebene Klassifizierung. Die erkenntnistheoretischen Klassifizierungen einer Formel als Definition oder empirisches Gesetz oder auch die Bezeichnung von Formeln als Kurzform oder Verallgemeinerung hingegen reflektieren stärker die Rolle von Formeln innerhalb der Physik. Dies geschieht in dieser Erhebung jedoch nicht explizit und spielt auch zahlenmäßig eine eher untergeordnete Rolle. (s. Kap. 12.3.4). Auch von den LehrerInnen beschriebene Tätigkeiten sind vorrangig Rechnungen (s. Kap. 12.3.1).

Bei den in dieser Erhebung beschriebenen Vorteilen einer Formel überwiegen unterrichtsimmanente Vorzüge (wichtig für Prüfungen, Formel als einfacher Lernstoff), physikimmanente Vorzüge, die Formeln als Darstellungsform mit ihren methodischen Vorteilen und physikspezifischer Bedeutung betonen, spielen nur am Rande eine Rolle (s. Kap. 12.3.1).

Im Folgenden sollen nun der Umgang mit Rechnungen im beobachteten Unterricht unter dem Blick auf einen eher technischen oder strukturellen Umgang hin näher untersucht werden. Unter diesem Aspekt ist insbesondere der Umgang mit dem Antwortsatz bei schriftlichen Rechnungen von Interessen (Kap. 15.1). Einheiten spielen in der Physik eine wichtige Rolle und beladen neben den Formelzeichen mathematische Ausdrücke mit physikalisch-inhaltlichen Bedeutungen. Darum soll in Kapitel 15.2 der Umgang mit Einheiten in dieser Erhebung näher beschrieben werden. Anschließend werden Unterschiede bei der Formulierung der Reihenfolge von Proportionalitäten analysiert werden, die bei der Behandlung des Ohmschen Gesetzes von Relevanz sind (Kap. 15.3). Neben dieser unterschiedlichen Handhabung mathematischer Inhalte im beobachteten Unterricht werden auch Äußerungen von LehrerInnen analysiert, die sich direkt auf den Mathematikunterricht beziehen, und somit auf unterschiedliche Weise auf mathematische Inhalte aus dem Physikunterricht heraus referieren (Kap. 15.4).

15.1. Der Antwortsatz bei Rechnungen

Rechnungen nehmen einen sehr hohen Stellenwert im hospitierten Unterricht ein: Die Kategorie *Rechnung* nimmt zahlenmäßig mit 281 Codings 17% der Codings in der Oberkategorie *Formel wird angewendet oder interpretiert* und 11% aller Codings ein. Im

Sprechen mit und über Formeln und in der Anwendung von Formeln können Rechnungen somit in dieser Erhebung als zentrales Element gesehen werden. Dieses Bild spiegelt sich auch für die einzelnen an der Erhebung beteiligten LehrerInnen wider: Die Kategorie *Rechnung* nimmt für die einzelnen LehrerInnen zwischen minimal 8% (Herr Schmitt) und maximal 35% (Herr Lenz) ein. Relevant ist die Kategorie somit bei allen LehrerInnen, es zeigen sich jedoch deutliche Unterschiede in den Häufigkeiten, in denen Rechnungen im Unterricht durchgeführt werden (vgl. Tab. D.2 im Anhang). Rechnungen als solches sind jedoch noch kein Indiz für einen eher technischen oder strukturellen Umgang mit Mathematik. Sie können unterschiedlich stark physikalische Kontexte miteinbeziehen und Übersetzungsprozesse zwischen Physik und Mathematik initiieren und demonstrieren. Eine gründliche Analyse der Rechenwege auf strukturellen oder technischen Umgang mit Mathematik hin, wie sie in den Arbeiten von Uhden (2012) und Geyer (2020) gemacht wurde, ist weder Schwerpunkt noch Zielstellung dieser Arbeit. Dennoch sollen im Folgenden einige Auffälligkeiten diskutiert werden, die Hinweise auf eher technischen oder eher strukturellen Umgang mit Mathematik geben.

Etwas mehr als der Hälfte der Textstellen, die sich auf Rechnungen beziehen, liegen Aufgaben zugrunde, die in experimentelle oder anwendungsbezogene sinnstiftende Kontexte eingebettet sind (Häufigkeiten der Unterkategorien *Rechnung ohne Kontext*, *Rechnung mit experimentellen Werten* und *Anwendungsaufgaben*, vgl. Diagramm 15.1).

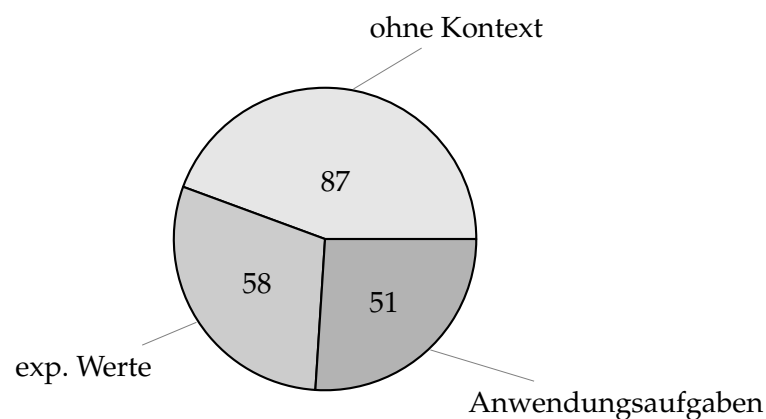


Abbildung 15.1.: Verteilung der unterschiedlichen Rechnungsarten in gesamter Stichprobe

Betrachtet man bei Rechnungen den Umgang mit dem Antwortsatz näher, dann zeigt sich jedoch ein etwas differenzierteres Bild, das diese Kontextorientierung abschwächt: In vielen Fällen wird der Antwortsatz bei schriftlichen Rechnungen an der

Tafel entweder nur mündlich oder gar nicht formuliert.

An der Tafel werden im hospitierten Unterricht insgesamt 31 Aufgaben mit gegeben-gesucht-Lösung-Schema notiert. Bei diesen ausführlichen schriftlichen Aufgaben wird nur in 6 Fällen ein Antwortsatz formuliert. In zwei weiteren Fällen wird er durch den Vermerk „Antwortsatz...“ in Erinnerung gerufen und mündlich formuliert. In den anderen 23 Rechnungen wird eine Lösung ebenfalls besprochen, zum Teil wird die Lösung der Rechnung durch doppeltes Unterstreichen auch im Tafelbild hervorgehoben, jedoch ist davon auszugehen, dass SchülerInnen eine mögliche Formulierung oder gar Interpretation des Ergebnisses in diesen Fall nicht schriftlich übernehmen und somit vermutlich nicht als Teil des Erwartungshorizontes bei physikalischen Rechenaufgaben wahrnehmen.

Die Antwortsätze zeigen einen unterschiedlich ausgeprägten Grad an Kontextualisierung des Ergebnisses. Drei Antwortsätze stellen eine reine Verbalisierung der durch die Rechnung erhaltenen physikalischen Größe dar (Zitat (1)). Zitat (2) deutet einen physikalischen Sinnzusammenhang an, in dem die erhaltene Antwort Relevanz hat. (3) konkretisiert diesen Sinnzusammenhang mit aus der Aufgabenstellung bekannten Fakten (dem Material des Drahtes). Zitat (4) ist die ausführlichste Antwort. Hier wird das Ergebnis beschrieben und zusätzlich gedeutet.¹

(1) „Der elektrische Widerstand beträgt rund $0,75\ \Omega$.“ (ABG5, TB)

(2) „Die Größe des erforderlichen Vorwiderstandes beträgt $31\ \Omega$.“ (AWR6, TB)

(3) „Der Kupferdraht muss eine Länge von wenigstens $6471\ m$ haben.“ (EPR10, TB)

(4) „Durch die Zuleitung entsteht ein Spannungsverlust von $29\ V$. Wird also an dem einen Ende eine Spannung von $230\ V$ angeschlossen, liegen an der Baustelle nur noch $201\ V$ an.“ (ABG6, TB)

Antwortsätze werden also in dieser Erhebung zum einen nur selten schriftlich festgehalten, zum anderen zeigen viele der gefundenen Formulierungen nur eine schwache Kontextorientierung. Ein wirklicher die Aufgabenstellung motivierender Sinn (n. Muckenfuß (1995), s. Kap. 3.3.4) wird SchülerInnen durch diese Antworten vermutlich nicht erkennbar werden. Dies kann derart interpretiert werden, dass so die technische Rolle der Mathematik gegenüber der strukturellen betont wird. Die Rechnung wird

¹Dieses Spektrum ist auch in den mündlich formulierten Antwortsätzen zu finden: Während (5) die Lösung nur wiedergibt, bettet (6) die Lösung anschaulich in den Kontext der Aufgabenstellung ein: (5): „Die Länge des Drahtes zehn Meter.“ (SBG6, 45); (6): „Es muss nach einer Länge von rund $95\ m$ gegraben werden. Ich meine, dass die nicht bloß ein kleines Loch graben, sondern dann schon so, das ist auch klar, damit sie auch rankommen.“ (LRR11, 225)

im hospitierten Unterricht oft aus einer physikalischen, seltener aus einer alltagsrelevanten Fragestellung heraus motiviert, wird dann jedoch rein technisch durchgeführt und nur in wenigen Fällen mit physikalischen Inhalten, die über das Benutzen von Formelzeichen hinausgehen, aktiv verknüpft.

15.2. Umgang mit Einheiten

Einheiten spielen in der Physik eine essenzielle Rolle. Erst durch die Verknüpfung einer Maßzahl mit einer Einheit wird ein Ausdruck zur Angabe einer physikalischen Größe. Es ist eine besondere Eigenschaft physikalischer Rechnungen, dass verschiedene Einheiten miteinander verrechnet werden können und dann eine neue Einheit ergeben können. Nach Karam, Uhden und Höttecke (2019) ist ein Verständnis der Einheiten bei Rechnungen außerdem ein wichtiger Baustein für Formelverständnis (s. auch Kap. 6). Einheiten stellen somit eine wichtige Brücke zwischen mathematischen Ausdrücken und physikalischen Inhalten dar. Damit sind sie ein grundlegendes Element bei der strukturellen Betrachtung von Mathematik im Physikunterricht.

Einheiten physikalischer Größen spielen im beobachteten Unterricht an verschiedenen Stellen eine Rolle. Bei ihrer Einführung werden sie erklärt und mit Bedeutung verknüpft. Außerdem spielen sie bei Rechnungen eine Rolle, wenn am Ende der Rechnung eine Einheitenkontrolle gemacht wird, oder wenn zu Beginn der Rechnung über das Umrechnen in Grundeinheiten gesprochen wird. Beide Aspekte sollen im Folgenden etwas näher erläutert und mit Beispielen hinterlegt werden.

15.2.1. Einführung von Einheiten

Bei der Einführung der Größe Widerstand wird die Einheit Ohm von allen LehrerInnen eingeführt und aus den bekannten Einheiten Ampere und Volt abgeleitet, 5 LehrerInnen notieren dies auch im Tafelbild (s. Beispieltafelbild Abb. 15.2). Außerdem wird die zusammengesetzte Einheit Ohm mehrfach mit einer physikalischen Bedeutung und einer anschaulicheren Vorstellung der Größe verknüpft. Dies spiegelt sich in der Kategorie *Beschreibung der Einheit* wider (s. Kap. 12.2.4). Durch Formulierungen wie „also Ohm heißt, wie viel VOLT, wie viel SPANNUNG brauche ich für ein Ampere.“ (SSG3, 149) werden Deutungsmöglichkeiten für eine Einheit gegeben, die somit ein Verständnis für die physikalische Größe selbst (hier: den elektrischen Widerstand) verbessern können. Diese Kategorie tritt jedoch nur für die Größe des elektrischen Widerstandes und seine Einheit Ohm auf.

Der elektrische Widerstand

Formelzeichen: R

Einheit(en): $1 \Omega = 1 \frac{\text{V}}{\text{A}}$ 1 Volt pro Ampere

$1 \text{ k}\Omega = 1000 \Omega$ $1 \text{ M}\Omega = 1000\,000 \Omega$

Berechnung des Widerstandes:

$$\text{elektrischer Widerstand} = \frac{\text{am Bauteil anliegende Spannung}}{\text{Stromstärke}}$$

$$R = \frac{U}{I}$$

Abbildung 15.2.: Tafelbild zur Einführung des elektrischen Widerstandes (KTH2, TB)

Für das Widerstandsgesetz gibt es ähnliche Textstellen für die Einheit des spezifischen Widerstandes, die der Kategorie *Beschreibung einzelner Größen* zugeordnet werden (s. Kap. 12.2.7). Das folgende Zitat zeigt in sehr kurzer Form, wie hier eine Einheit mit einer physikalischen Vorstellung verbunden wird, die in diesem Fall geometrische Vorstellungen enthält: „Also, wie viel Ohm hat ein Material, bei einer Fläche von ein Millimeter auf einem Meter Länge?“ (HBG3, 132). Hier werden Einheiten somit nicht nur als Maßangaben verwendet, sondern genutzt, um eine Vorstellung eines physikalischen Sachverhaltes zu vermitteln.

15.2.2. Einheitenkontrolle und Umrechnung in Grundeinheiten

Bei Rechenaufgaben werden Einheitenkontrollen nur bei 8 der 10 LehrerInnen identifiziert. Insgesamt werden in 20 Unterrichtspassagen Einheiten kontrolliert. Diese betreffen nur einen Bruchteil der Rechnungen, die insgesamt im beobachteten Unterricht gemacht werden.² Dieser große zahlenmäßige Unterschied kann als Hinweis darauf gedeutet werden, dass Einheitenkontrollen eine eher untergeordnete Rolle bei Rechnungen spielen.³ Es werden nicht bei allen Rechnungen die Einheiten kontrolliert. Diese Aussage trifft auch auf alle Aufgaben zu, die an der Tafel vorgerechnet werden, bei denen sich also eine Einheitenkontrolle anbieten würde.

Einheitenkontrollen werden sowohl für Rechnungen mit der Definitionsformel als

²Insgesamt gibt es 281 codierte Textstellen für Rechnung. Davon sind 138 klassische Rechenaufgaben (Kategorien *Rechnung ohne Kontext* und *Anwendungsaufgabe*). Bei Rechnungen mit experimentellen Werten werden häufig die Rechnungen direkt in einer Tabelle eingetragen, bei der Ermittlung oder Überprüfung von Werten mittels Proportionalitäten wird ohne Formel gerechnet, was eine Einheitenkontrolle überflüssig macht.

³Jedoch müssen die Zahlen vorsichtig interpretiert werden, da häufig mehrere Textstellen zu einer Rechnung codiert werden, in einer Rechnung sinnvoller Weise jedoch nur einmal eine Einheitenkontrolle gemacht wird. Außerdem bieten sich Einheitenkontrollen insbesondere bei an der Tafel vorgerechneten Aufgaben an, einige der Aufgaben werden jedoch nur mündlich gestellt.

auch mit dem Widerstandsgesetz durchgeführt. Für die Formel $R = \frac{U}{I}$ geschieht dies, indem am Ende der Rechnung noch einmal explizit darauf hingewiesen wird, dass die Einheiten $\frac{V}{A}$, die bei der Rechnung von $\frac{U}{I}$ herauskommen, durch die Einheit Ω ersetzt werden können (Zitat (1)). Dies geschieht auch für umgestellte Formeln, wie das Zitat (2) zeigt. In diesem Beispiel wird die Einheitenkontrolle auch genutzt, um ein richtiges Umstellen der Formel zu kontrollieren. Auch für das Widerstandsgesetz werden Einheiten für Rechnungen mit der Grundformel und für eine umgestellte Form durchgeführt. Zitat (3) zeigt eine Einheitenkontrolle im Unterrichtsgespräch mit zugehörigem Tafelbild (s. Abb. 15.3)

(1) Herr Meyer: „Und Volt durch Ampere ergibt?“

Lisa: „Ergibt Ohm?“ (EPR9, 66-67)

(2) Frau Müller: „In welcher Einheit erwarten wir unser U , unser Ergebnis? [...] In Volt. Genau. Jetzt müssen wir überlegen, ob Ohm mal Ampere Tatsache Volt ergibt. Und da ersetzen wir mal das Ohm durch die Einheit, die ihr vorhin schon immer genannt habt. Wir haben gesagt Ohm ist dasselbe wie Volt durch Ampere. (...) Und da haben wir also zwei Volt durch Ampere mal Ampere und siehe da, das Ampere kürzt sich weg und es bleibt das Volt übrig, ich habe also richtig umgeformt.“ (BTR3, 117-119)

(3) Frau Carle: „Und jetzt kannst du gucken, ob es stimmt. Kann ich kürzen. Quadratmillimeter mit Quadratmillimeter. Meter mit Meter. Und schon bleibt bloß noch Ohm übrig.“ (LRR10, 190)

LB S.17/5

geg. $l = 50\text{ m} \times 2$
 $l = 100\text{ m}$ ges. $R \text{ in } \Omega$

$\rho_{\text{Cu}} = 0,0172 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$ Lös: $R = \rho \cdot \frac{l}{A}$

$A = 1,5 \text{ mm}^2$ $R = 0,0172 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \cdot \frac{100\text{ m}}{1,5 \text{ mm}^2}$

$R = 1,1 \Omega$

Abbildung 15.3.: Tafelbild mit Rechnung zum Widerstandsgesetz (LRR10, TB)

An anderen Stellen im Unterricht wird immer wieder darauf hingewiesen, dass für eine Rechnung in die Grundeinheiten der jeweiligen Größen umgerechnet werden muss („Dabei müssen wir bitte auch morgen immer daran denken, (...) in Ampere umrechnen. Grundeinheiten, genau.“ (ABG6, 26)). Herr Lenz betont in diesem Zusammenhang auch die Wichtigkeit der Einheiten, um überhaupt physikalische Größen

zuordnen zu können: „Wer aber [...] weder hier eine Einheit, noch hier eine Einheit hingeschrieben hat, der hat gleich zwei Punkte Abzug bekommen, weil da kann ich GAR nicht mehr nachvollziehen, was für Größen das waren. Sind das Milliampere, sind das Ampere? Und dann kann man auch nicht nachvollziehen, ob ihr richtig gerechnet habt.“ (HBG3, 9).

Im Rahmen von Rechnungen werden somit sowohl Einheitenkontrollen durchgeführt, als auch betont, dass in Grundeinheiten gerechnet werden muss. Wie die Beispiele zeigen, geschieht beides in der Regel, ohne dass die physikalische Bedeutung der Betrachtungen ausführlich diskutiert wird. Der Umgang mit den Strategien erscheint eher als ein Teil des Rechenprozesses, der unreflektiert zum formalen Prozess gehört, beispielsweise als Kontrollmöglichkeit. Jedoch bieten beide Verfahren Ansätze, um die Rechnungen mit physikalischen Größen und damit Inhalten zu verknüpfen und somit ein strukturelles Vorgehen zu stärken. Dies könnte deutlich vertieft werden, indem diskutiert würde, *warum* eine Einheitenkontrolle physikalisch sinnvoll und wichtig ist oder *warum* unbedingt mit Grundeinheiten gerechnet werden muss.

15.3. Reihenfolge von Proportionalitäten

Die Reihenfolge, in der Proportionalitäten verbalisiert werden, macht mathematisch keinen Unterschied. Die Ausdrücke $x \sim y$ und $y \sim x$ sind mathematisch äquivalent und beschreiben, dass die Variablen x und y proportional zueinander sind. Werden die Variablen x und y jedoch durch physikalische Größen ersetzt, dann macht es physikalisch einen inhaltlichen Unterschied, ob x proportional mit y steigt oder y proportional mit x , da x und y in einem funktionalen Zusammenhang stehen, bei dem sich entweder x in Abhängigkeit von y ändert ($y \sim x \rightarrow y(x)$) oder umgekehrt ($x \sim y \rightarrow x(y)$). Dieser funktionale Zusammenhang kann durch eine physikalische Kausalität (wenn-dann-Beziehung) beschrieben werden, die im Unterricht häufig auch in Form von je-desto-Sätzen formuliert wird (s. Tab. 15.1). Diese wenn-dann-Beziehung kann beispielsweise bedeuten, dass eine Größe in einem Experiment manipuliert wird und sich dadurch eine messbare, von dieser Größe abhängige Größe, verändert. Alternativ könnte eine wenn-dann-Beziehung auch eine umgekehrte Kausalität im Sinne einer Schlussfolgerung beschreiben, beispielsweise: Wenn ich eine größere Stromstärke messe, dann lässt das auf eine größere anliegende Spannung rückschließen.

In dieser Erhebung sind diese Betrachtungen insbesondere für das Ohmsche Gesetz von Relevanz. In Kapitel 14.1 wird beschrieben, dass die Reihenfolge, in der das Ohmsche Gesetz verbalisiert wird, variiert. 39 mal wird die Reihenfolge $I \sim U$, 25 mal

Proportionalität	fkt. Zshg.	je-desto-Satz
$y \sim x$	$y(x)$	Je größer x , desto größer y .
$x \sim y$	$x(y)$	Je größer y , desto größer x .
$I \sim U$	$I(U)$	Je größer die Spannung, desto größer die Stromstärke.
$U \sim I$	$U(I)$	Je größer die Stromstärke, desto größer die Spannung.

Tabelle 15.1.: Reihenfolge von Proportionalitäten

$U \sim I$ verwendet. Bei der Formulierung der Proportionalität zwischen der Spannung und der Stromstärke machen die LehrerInnen somit auf den ersten Blick keinen Unterschied, sondern verwenden beide Ausdrücke meist synonym. Eine Ausnahme stellt das folgende Zitat dar, in dem die Lehrerin explizit erklärt, warum die Formulierung $I \sim U$ physikalisch sinnvoller ist:

Frau Carle: „Wer ist denn hier zu wem proportional?“

Maria: „(Die Spannung?)“

Frau Carle: „Naja, aber eigentlich andersrum, ne? Die Stromstärke ist ja von der Spannung abhängig, also die Stromstärke ist proportional zur?“

Maria: „Spannung.“

Frau Carle: „Denn? Die Stromstärke WÄCHST mit der Spannung mit, ne? So rum formulieren!“ (LRR4, 61-65)

Je-desto-Sätze werden vorrangig in der Reihenfolge „je größer die Spannung, desto größer die Stromstärke“ formuliert. Bei der Formulierung von je-desto-Sätzen wird somit meist intuitiv die physikalisch sinnvollere Reihenfolge genutzt: Die Veränderung der Spannung beeinflusst den Stromfluss. Dies wird jedoch nicht weiter erklärt. Manchmal werden auch bewusst beide Reihenfolgen synonym genutzt, wie das folgende Beispiel zeigt:

Frau Carle: „Je größer die Spannung, desto größer die Stromstärke. Oder wir hatten umgekehrt gesagt: Je größer die Stromstärke ist, desto größer meine Spannung.“ (LRR5, 25-26)

Dieses Beispiel zeigt als Auffälligkeit, dass im zweiten Satz formuliert wird „desto größer *meine* Spannung“. Diese könnte auf eine Interpretation im Sinne einer Schlussfolgerung, wie oben beschrieben, hindeuten („meine angelegte Spannung“). Deutlicher

wäre hier eine Formulierung in der Vergangenheit (desto größer *war* die / meine Spannung).

Bei der Formulierung von aus der Definitionsformel abgeleiteten je-desto-Sätzen zeigt sich im folgenden Zitat eine Besonderheit. Der Lehrer formuliert zunächst einen je-desto-Satz analog zu dem Ausdruck $R \sim \frac{1}{I}$, also der Widerstand ist umgekehrt proportional zur Stromstärke. Sobald er diesen Ausdruck physikalisch interpretiert und im Modell der Elektronenleitung erklärt, verändert er jedoch die Reihenfolge zum physikalisch sinnvollerem Ausdruck $I \sim \frac{1}{R}$. Schließlich beeinflusst der Widerstand als Materialeigenschaft die Größe der Stromstärke und nicht die Stromstärke, wie groß der Widerstand eines Leiters ist.

Herr Lenz: „Je KLEINER die Stromstärke bei konstanter Spannung, (...) desto GRÖßER ist der Widerstand. (12 s) Wir haben einen Antrieb, der die Elektronen von Minus- zum Pluspol leiten will, aber je größer der Widerstand ist, der sich dieser Bewegung der Elektronen entgegen setzt, desto weniger kommen durch, desto kleiner ist die Stromstärke.“ (HBG2, 21-36)

Die Formulierungen von Proportionalitäten und je-desto-Sätzen scheinen somit in dieser Erhebung häufig die physikalische Bedeutung der Ausdrücke nicht zu berücksichtigen. Dies deckt sich auch mit den Erkenntnissen zu den Kategorien *je-desto* (s. Kap. 12.2.5) und *Veränderung in gleichem Maße* (s. Kap. 12.2.5), bei denen ebenfalls meist rein mathematische Formulierungen gemacht werden. Die physikalischen Größen scheinen als eine Art Platzhalter für Variablen eingesetzt zu werden, ohne dass der physikalisch-mathematische Ausdruck in seiner veränderten Bedeutung interpretiert wird. Die physikalische Bedeutung kommt dann hinzu, wenn die (mathematischen) Veränderungen mit einer (physikalischen) Bedeutung verknüpft werden, also mit einer Kausalität, wenn-dann-Beziehung oder einer zeitlichen Reihenfolge. Dies konnte nur bei *Veränderung in gleiche Richtung* gefunden werden (s. Kap. 12.2.5). Diese Beobachtungen deuten darauf hin, dass bei der Beschreibung des Verhaltens von Größen meist ein technischer Blick auf die mathematischen Zusammenhänge physikalischer Größen vorherrscht und physikalische Bedeutungen nicht mitgedacht und nur selten explizit formuliert werden.

15.4. Verknüpfung von Mathematik und Physik

Auf verschiedene Weise beziehen sich die an der Erhebung beteiligten LehrerInnen auf den Mathematikunterricht oder mathematische Inhalte und Fähigkeiten. Diese

Aussagen lassen zum Teil eine Wertung zu, wie die Rolle der Mathematik im Physikunterricht gesehen wird. Die folgenden Punkte werden von LehrerInnen angesprochen und sollen unten näher beschrieben und mit Beispielen belegt werden.

- **Reaktivierung:** Aus dem Mathematikunterricht bekannte Inhalte werden reaktiviert oder wiederholt.
- **Mathe unbekannt:** Es werden mathematische Inhalte neu eingeführt oder benannt, die noch nicht aus dem Mathematikunterricht bekannt sind.
- **Mathe ohne Physik:** Es wird betont, dass die folgenden Schritte rein mathematisch sind. Damit wird bewusst die Physik ausgeblendet.
- **Unterschiede Mathe und Physik:** Es werden Unterschiede zwischen Mathematik und Physik beschrieben.
- **Wertung:** Mathematisches Vorgehen wird (implizit) bewertet, beispielsweise als etwas Schwieriges innerhalb der Physik.

In vielen Fällen **reaktivieren** die LehrerInnen explizit Inhalte, die aus dem Mathematikunterricht bekannt sein sollten und wiederholen diese unterschiedlich ausführlich. Insbesondere die mathematischen Grundlagen zur Proportionalität werden von den Mittelschullehrerinnen Frau Berger, Frau Müller, Frau Gerber und Frau Carle sehr ausführlich wiederholt (Beispielzitat von Frau Berger im Anhang unter D.6.7). Sie besprechen den entstehenden Graphen der proportionalen Größen, dass sich bei direkter Proportionalität die Größen in gleicher Weise verändern und dass Quotientengleichheit gelten muss. In anderen Fällen benennen LehrerInnen die aus dem Mathematikunterricht bekannten Inhalte lediglich, ohne sie noch einmal ausführlich zu beschreiben (Zitat (1)). Häufig werden für die Reaktivierung mathematischer Kenntnisse auch aus der Mathematik bekannte Notationen (x und y anstelle physikalischer Formelzeichen) genutzt (Zitat (2)).

(1) Frau Berger: „Ich habe jetzt vorausgesetzt, dass ihr mit euren mathematischen Kenntnissen von alleine die Formel R ist gleich U durch I umstellen könnt. Das dürfte eigentlich, von den Mathematikkenntnissen her, kein Problem mehr sein. [...] Ihr seid schon bei den linearen Funktionen, also müsstet ihr Formelumstellen in Mathe bereits gehabt haben.“ (AWR4, 215)

(2) „ $2 = \frac{x}{3} \mid \cdot 3$ “ (BTR3, TB)

In anderen Fällen sprechen PhysiklehrerInnen explizit an, dass eigentlich notwendige mathematische Kenntnisse **unbekannt** sind. In dieser Erhebung zeigen die LehrerInnen unterschiedliche Strategien im Umgang mit diesen fehlenden Kenntnissen. Der Inhalt wird entweder erklärt (Zitat(3)), die SchülerInnen sollen eine unbekannte (mathematische) Formel recherchieren und benutzen (Zitat (4)), die Lösung wird vorgegeben (Zitat (5)) oder der mathematische Inhalt wird weggelassen (Zitat (6)).

(3) Herr Lenz: „Und was bedeutet jetzt dieses minus E minus fünf? Das wird man öfters mal sehen und irgendwie die Mathelehrer, die machen es immer nie, wenn sie den Taschenrechner einführen. Ab und zu kommt man da aber drauf, gerade auch bei Experimenten. Dieses E minus fünf kann man sich einfach so vorstellen: Ich muss mein Komma um fünf Stellen nach links verschieben. Mehr braucht man dazu nicht wissen.“ (HBG3, 74)

(4) Herr Schmitt: „Wir müssen mal ein bisschen was machen, was ihr in Mathematik noch nicht gemacht habt, kommt nämlich in Mathe erst in Klasse neun. Ihr sucht euch mal im Tafelwerk die FORMEL raus, wie man den Flächeninhalt eines KREISES bestimmt. (...) DENN (...) wir haben bei unserem DRAHT nur den DURCHMESSER gegeben.“ (SSG7, 80)

(5) Herr Weber: „Es ist für euch ein bisschen blöd, (...) weil da steht nur drauf, was für ein Durchmesser der hat. (...) Der Leiter. Und die Querschnittsfläche ist eigentlich entscheidend. Ich hab die mal ausgerechnet. Ihr könnt die nur noch nicht ausrechnen, weil ihr in Mathe noch gar nichts vom Kreis gehört habt.“ (KPR7, 49)

(6) Herr Funke: „Es ist auch bei einer Glühlampe keine Gerade vorzusehen, diese zu zeichnen, sondern es SOLL, hattet ihr schon Wurzelfunktionen?“ – mehrere SchülerInnen: „Nein.“ – „OK. Eine PARABEL?“ – „Nein.“ – „Naja gut, ok. Dann müssen wir das einfach so weglassen.“ (SBG6, 71-75)

Häufig wird während der Auswertung von experimentellen Daten oder bei Rechnungen die Physik explizit ausgeblendet und betont, dass nun rein mathematisch gearbeitet werden soll. In solch einem Fall lassen die LehrerInnen beispielsweise Einheiten weg, um Rechnungen zu vereinfachen (Zitat (7)). Oder sie betonen, dass zur Lösung (rein) mathematische Schritte notwendig sind (Zitat (8)). In anderen Fällen verlangen sie mathematische Formulierungen gemeinsam erarbeiteter Erkenntnisse, damit ist im hospitierten Unterricht in der Regel eine Formel oder die Angabe einer Proportionalität gemeint (Zitat (9)).

(7) Frau Carle: „Jetzt machen wir Mathe. Jetzt diskutieren wir über Mathe. [...] Zwölf Volt durch Null Komma Zwei. Lassen wir das Volt weg. Zwölf durch Null Komma Zwei.“ (LRR6, 40-42)

(8) Herr Lenz: „WELCHEN mathematischen Schritt müssen wir gehen, um von der Gleichung für den Widerstand auf die Gleichung für die Spannung zu kommen?“ (HBG2, 45)

(9) Herr Schmitt: „Können wir es vielleicht AUCH wieder mathematisch formulieren?“ (SSG8, 11)

An wenigen Stellen im hospitierten Unterricht weisen LehrerInnen darauf hin, dass es Unterschiede zwischen Mathematik und Physik gibt. Dies belegen sie damit, dass nicht alles, was mathematisch möglich ist, auch physikalisch sinnvoll ist, da beispielsweise Einheiten berücksichtigt werden müssen (Zitat (10)). In anderen Fällen wird dies nur benannt und nicht begründet (Zitat (11)) oder es wird einfach nur beschrieben, dass in der Physik andere Begrifflichkeiten üblich sind als in der Mathematik (Zitat (12)).

(10) Herr Meyer: „VIELE nehmen einfach nur hier die Zahlen und rechnen wild drauf los ohne physikalischen Zusammenhang. Sicherlich kann man einundzwanzig minus drei rechnen oder einundzwanzig DURCH drei und dann kommt man auf sieben und dann will man noch einen Einheit hinschreiben und schreibt Grad Celsius dazu, weil es eben gerade nun mal so ist. So GEHTS NATÜRLICH nicht.“ (EPR9, 50)

(11) Frau Berger: „Wenn ich I durch U nehme, so ist es falsch [...] Aber ich kann auch I durch U rechnen, aber das ist in der Physik/ gewöhnt euch das gar nicht erst an. Wir machen U durch I .“ (AWR2, 82)

(12) Herr Jasper: „Ich kenne keine x-Achse. Ich bin Physiker. (...) x-Achse kennen nur Mathematiker. (...) Deswegen heißt die Abszissen-Achse, nämlich mit A beginnend, weil dort die AUSgangsgröße eingetragen wird.“ (ABG3, 28)

Einige LehrerInnen bewerten Unterschiede zwischen Mathematik und Physik oder die notwendige Zusammenarbeit der beiden Fächer negativ oder positiv. Negative Konnotationen werden vermittelt, indem mangelnde Kenntnisse der SchülerInnen beklagt werden (Zitat (13)), die Übertragung von Kenntnissen aus dem Unterricht implizit als nicht zu erwarten dargestellt wird (Zitat (14)) oder mathematische Schritte implizit als etwas Schweres angekündigt werden (Zitat (15)). Nur an einer Stelle kann

aus der Aussage einer Lehrerin implizit etwas Positives herausgelesen werden, was die Mathematik oder der Mathematikunterricht für SchülerInnen im Physikunterricht leisten kann: Wer die mathematischen Grundlagen beherrscht, der muss sich weniger merken (Zitat (16)).

(13) Herr Schmitt: „ABER übliches Problem der Physiker. Wir werden durch die Mathematik ausgebremst.“ (SSG7, 78)

(14) Herr Weber: „So, ein bisschen müsstet ihr das kennen, aus der Mathematik Klasse 6, ne? Wie nennt man denn Zusammenhänge, wenn ich also zwei Größen einander gegenüber stelle und es entsteht eine gerade Linie? Eine Gerade? Wie nennt man sowas in der Mathematik? Jetzt könnt ihr mich begeistern. Wenn DAS jetzt kommt, gehe ich nachher SOFORT zu Frau X [Bem.: die Mathematiklehrerin], umarme sie und sage: Die 8-x hat es gewusst.“ (KPR3, 38)

(15) Frau Berger: „Jetzt kommt die MATHEMATIK ins Spiel [gespieltes tiefes Luftholen]. Da muss man nicht gleich tief Luftholen. [Lachen] Ihr denkt mal bitte an Mathematik der sechsten Klasse. Wenn ich zwei Zahlenfolgen hab, die beide größer werden, welche VERMUTUNG könnte dann aufgestellt werden? (...) Das weiß nicht nur einer (...) Los!“ (AWR2, 48)

(16) Frau Müller: „Diese Formeln wie gesagt. Entweder ich lerne sie auswendig. Oder ich kann sie mit Hilfe des Dreieckes mir HERLEITEN. Oder ich kann sie mir mit meinen MATHEMATISCHEN Kenntnissen HERLEITEN, wie ihr es im Mathematikunterricht gelernt habt.“ (BTR4, 187)

Diese vereinzelt vorkommenden Kommentare zeigen, dass mathematische Fähigkeiten in der Regel als aus dem Mathematikunterricht bekannt vorausgesetzt werden. In Einzelfällen werden sie noch einmal explizit wiederholt. Einige LehrerInnen versuchen, die SchülerInnen bei der Übertragung mathematischer Fähigkeiten zu unterstützen, indem sie aus dem Mathematikunterricht bekannte Notationen verwenden. Dies erscheint in Hinblick auf die empirisch belegten Übertragungsschwierigkeiten von SchülerInnen (s. Kap. 3.3.5) eine sinnvolle Strategie, wird jedoch nur in Einzelfällen gemacht. Dennoch wird bei dem expliziten Rückbezug auf den Mathematikunterricht die Physik meist nicht explizit berücksichtigt, sondern zum Teil als etwas Schwierigkeits erzeugendes bewusst ausgeblendet (s. Zitat (7)). Dies deutet auf eine eher technische Rolle der Mathematik im hospitierten Unterricht hin: Mathematische Fähigkeiten sind technisches Werkzeug, das beherrscht werden muss, werden aber nicht physikspezi-

fisch interpretiert. Diese Rolle ist in vielen Fällen auch durchaus sinnvoll und kann lernförderlich sein, da sie eine kognitive Entlastung ermöglicht (s. Kap.2.1.2).

In einem strukturellen Sinne wird sich insbesondere dann auf Mathematik bezogen, wenn Unterschiede zwischen Mathematik und Physik erklärt werden (Zitat (10)).

15.5. Zusammenfassende Diskussion: Technischer und struktureller Umgang mit Mathematik

Der Umgang mit verschiedenen Aspekten der Mathematik im beobachteten Physikunterricht lässt somit Hinweise auf eine eher technische oder eher strukturelle Rolle der Mathematik zu, die in Tabelle 15.2 noch einmal gegenübergestellt werden. Diese Hinweise lassen die Vermutung zu, dass häufig eher technisch gearbeitet wird. Unterschiedliche Aspekte einer strukturellen Verknüpfung von Mathematik und Physik werden teilweisen angesprochen oder kommen implizit zum Tragen.

eher strukturell	eher technisch
Rechnung häufig mit Kontextorientierung	seltene Formulierung von Antwortsätzen bei Rechnungen
Einführung und Beschreibung von Einheiten	Einheitenkontrolle: nur sporadisch, ohne physikalische Reflexion
Formulierungen bei <i>Veränderung in gleichem Maße</i> (phys. sinnvolle Reihenfolge $I \sim U$)	Formulierungen bei <i>Veränderung in gl. / umgekehrte Richtung</i> (willkürliche Reihenfolge der Proportionalitäten)
Unterschiede zwischen Mathematik und Physik werden beschrieben	es wird ein rein mathematisches Vorgehen betont mathematische Inhalte losgelöst von physikalischen Inhalten reaktiviert
erkenntnistheoret. Klassifizierung als Definition oder empirisches Gesetz, Verallgemeinerung oder Kurzform	vorrangig Betonung des Werkzeugcharakters von Formeln, um etwas zu berechnen

Tabelle 15.2.: Zusammenfassung der Hinweise auf eher strukturellen oder technischen Umgang mit Mathematik

Teil IV.

Zusammenfassung und Ausblick

16. Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

Diese Arbeit befasst sich mit der Verknüpfung von Formeln als algebraische Darstellungsformen mit verbaler Sprache im Physikunterricht. Im Theorieteil wurden theoretische Grundlagen und fachdidaktische Erkenntnisse zur Mathematik und zu Formeln im Physikunterricht dargestellt. Zentrales Ergebnis ist hierbei eine Ableitung von Aspekten eines umfassenden Formelverständnisses, das über eine reine Bedeutungszuweisung von Termini und Operationen zu Formelzeichen hinausgeht (s. Kap. 6). Außerdem wurden die sprachlichen Varietäten Alltagssprache, Unterrichtssprache und Fachsprache mit ihren jeweiligen Merkmalen und ihrer spezifischen Rolle für das Lernen von Physik diskutiert. Es wurde ein Ebenenmodell der Versprachlichung von Formeln aus der Theorie abgeleitet und durch verschiedene empirische Studien und Anwendungen erprobt und weiterentwickelt (s. Kap. 5.4). Das Modell beschreibt die Verbalisierung von Formeln und das Sprechen über Formeln in 6 Ebenen unterschiedlicher semantischer Dichte und einer Meta-Ebene (s. Abb. 5.6). Die Ebenen unterscheiden sich von I bis VI in absteigender Menge an Informationen, die auf wenig Raum zusammengefasst ist. Die geschriebene Formel (Ebene I) weist dabei die höchste semantische Dichte auf. In Ebene I, IIA, IIB und III wird die Formel selbst notiert oder gesprochen. Ebenen IV, V und VI stellen Interpretationen und Anwendungen der Formel in Alltags-, Unterrichts- und Fachsprache dar. In einer zusätzlichen Meta-Ebene wird *über* die Formel als Darstellungsform reflektiert. Das Modell hat sich als geeignet für die Beschreibung und Analyse des Sprechens von und über Formeln erwiesen.

Die zentrale Forschungsfrage der Arbeit lautet:

In welcher Form und wie oft verbalisieren LehrerInnen Formeln im Physikunterricht?

Diese Forschungsfrage wurde beantwortet, indem das Sprechen von 10 LehrerInnen (Gymnasium und Mittelschule) im Physikunterricht mit Hilfe einer qualitativen Inhaltsanalyse nach Kuckartz (2016) analysiert wurde. Exemplarisch wurden diese

Analysen auf Unterricht der Klassenstufe 8 zum Thema elektrischer Widerstand mit der Definitionsformel für den Widerstand $R = \frac{U}{I}$, dem Widerstandsgesetz $R = \rho \cdot \frac{l}{A}$ und dem Ohmschen Gesetz $I \sim U$ angewendet. Die Häufigkeiten des Auftretens der einzelnen Ebenen wurden für diese drei Formeln und für die 10 an der Erhebung beteiligten LehrerInnen vergleichend diskutiert.

Die Ergebnisse zeigen ein sehr vielfältiges Sprechen und Anwenden von Formeln, das das entwickelte Kategoriensystem (Abb. 12.2) widerspiegelt. Die Ergebnisse können in drei zentrale inhaltliche Bereiche gegliedert werden: LehrerInnen sprechen Formeln, LehrerInnen wenden Formeln an oder interpretieren diese und LehrerInnen sprechen über Formeln. Die zentralen Erkenntnisse dieser drei Bereiche sind in den Kapiteln 14.1, 14.2 und 14.3 zusammengefasst. Allgemein zeigt sich ein sehr vielfältiges Sprechen, insbesondere im Sprechen *über* Formeln können Unterschiede zwischen den drei betrachteten Formeln ausgemacht werden (s. Kap. 14.4 für eine Gesamtauswertung und Interpretation der Ergebnisse). Es zeigt sich, dass die an der Erhebung beteiligten LehrerInnen sehr viele Aspekte von Formelverständnis, wie es in theoretischen und empirischen fachdidaktischen Arbeiten beschrieben wird, ansprechen. Diese Aspekte bleiben jedoch häufig nur implizit mit der Formel verknüpft (s. Kap. 14.5).

Folgende Teilfragen der Forschungsfrage können nun mit Bezug auf die jeweiligen Ergebnis-Kapitel beantwortet werden:

1. Welche Ebenen der Versprachlichungen nutzen LehrerInnen? Es zeigt sich, dass alle 10 hospitierten LehrerInnen bis auf Ebene IIA (Wortformel) alle Ebenen des Ebenenmodells in ihrem Unterricht verwenden. Formeln werden somit notiert, Formelzeichen und mathematische Operationen werden verbalisiert, Formeln werden vielfältig in Alltags-, Unterrichts- und Fachsprache angewendet und interpretiert. Nur selten werden Wortformeln an der Tafel notiert, bei denen die physikalischen Fachtermini ausgeschrieben werden.

Die Häufigkeiten der Ebenen zeigen, dass die meisten Anwendungen und Interpretationen von Formeln in Fachsprache erfolgen. Die Ebene IIA (Wortformel) kommt nur sehr selten vor und Formeln werden häufiger mit Formelzeichen als mit Termini gesprochen (s. Diagramm 13.3). Die Ebenen treten von LehrerIn zu LehrerIn in unterschiedlicher Häufigkeit auf (s. Diagramme D.22 im Anhang). Eine genauere Analyse der Verwendung der Ebenen im Vergleich einzelner LehrerInnen führt zu einer Charakterisierung des Sprechens der unterschiedlichen LehrerInnen. Extremfälle können als fachsprachliches Sprechen, schülernahes Sprechen, ausgewogenes Sprechen oder reflektierendes Sprechen beschrieben werden (s. Kap. 13.3). Auch im Vergleich der drei Formeln zeigen sich leichte Unterschiede in der Verwendung der Ebenen

(s. Diagramm 14.1). Generell überwiegen Äußerungen in Fach- und Unterrichtssprache gegenüber Äußerungen in Alltagssprache. Dies muss vor dem Hintergrund theoretischer Überlegungen zur Rolle der drei sprachlichen Varietäten (s. Kap. 4.2.3) kritisch reflektiert werden, da Alltags- und Unterrichtssprache insbesondere bei Vermittlung neuer Inhalte eine besondere Relevanz für das Lernen im Physikunterricht haben.

2. Wie häufig werden Formeln von LehrerInnen im Physikunterricht sprachlich angewendet oder interpretiert im Vergleich zu reinem „Sprechen“ von Formeln?

Formeln werden in dieser Erhebung insgesamt deutlich häufiger angewendet oder interpretiert als gesprochen. Dies zeigt sich in den deutlichen Unterschieden der Codingzahlen für die drei Oberkategorien (*Formel wird gesprochen* macht 19% aller Codings aus, s. Diagramm 12.1) beziehungsweise für die Ebenen I-III im Vergleich zu den Ebenen IV-VI und Meta-Ebene (s. Diagramme 14.1). Die Anwendung und Interpretation von Formeln spielt im Unterricht somit eine wichtige Rolle.

Die Häufigkeit, mit der Formeln gesprochen werden, im Vergleich zur schriftlichen Notation variiert je nach betrachteter Formel. Während Definitionsformel und Ohmsches Gesetz wesentlich häufiger gesprochen als geschrieben werden, wird das Widerstandsgesetz etwa gleich oft geschrieben wie gesprochen. Dies könnte mit der Länge der Formel zusammenhängen: Das lange Widerstandsgesetz ist mündlich gesprochen aufgrund der Vielzahl an Termini, die mit mathematischen Operatoren verknüpft werden, recht „unhandlich“, darum wird es selten mit all seinen Komponenten verbalisiert.

3. In welcher Form werden Formeln durch LehrerInnen sprachlich angewendet, interpretiert und kontextualisiert?

Die dritte Teilfrage der Forschungsfrage lässt sich durch die mit Hilfe der Kategorien ausdifferenzierte Beschreibung der Ebenen IV, V, VI und Meta-Ebene des Ebenenmodells beantworten (s. Kap. 13.1, die inhaltliche Ausgestaltung der Ebenen wird als zentrales Ergebnis dieser Arbeit in Abb. 16.1 noch einmal dargestellt.). Das Ergebnis zeigt sehr vielfältige Anwendungen, Interpretationen und Kontextualisierungen. Diese sind in der Beschreibung der entsprechenden Kategorien in Kapitel 12.2 ausführlich ausgeführt.

Das entstandene Kategoriensystem (Abb. 12.2) und der Codierleitfaden (s. Anhang B.1) erwiesen sich als gutes Instrument, um das Sprechen mit und über Formeln im Physikunterricht zu beschreiben und zu analysieren. In den Tabellen 14.1 und 14.2 ist eine Übersicht zu finden, welche Kategorien für welche Formeln und bei welchen LehrerInnen auftreten. Hieraus ist zu entnehmen, dass nur 14 der 21 Kategorien für alle Formeln auftauchen, wobei jedoch nur die Kategorien *Beschreibung der Einheit* und



Abbildung 16.1.: Zuordnung der Kategorien zu den Ebenen des Ebenenmodells

Messprinzip nur für eine Formel (die Definitionsformel) auftauchen. Dies weist auf eine gute Übertragbarkeit auch auf andere, in dieser Erhebung nicht berücksichtigte, Formeln hin.

Die Anzahl der Kategorien in den jeweiligen Ebenen zeigt die auch in den Häufigkeiten zu lesende starke Rolle der Fach- und Unterrichtssprache. Der alltagssprachlichen Ebene VI konnten nur zwei Kategorien zugeordnet werden, die meisten Kategorien sind Ebene IV (fachsprachliche Anwendung und Interpretation) zuzuordnen.

Deutliche Unterschiede zwischen den drei betrachteten Formeln zeigen sich in der Meta-Ebene. Dies deutet darauf hin, dass epistemologische Unterschiede zwischen Formeln im Unterricht angesprochen werden (Kategorie *Klassifizierung*) und auch implizit in den Unterricht Eingang finden und sich in der Art, wie LehrerInnen *über* die jeweilige Formel sprechen, niederschlagen. Die auftauchenden Kategorien der Meta-Ebene zeigen außerdem, dass LehrerInnen neben Informationen über eine konkrete Formel (z. B. Gültigkeitsbedingungen oder Anwendungsbereich) auch Äußerungen machen, die sich auf Formeln als Darstellungsform beziehen (Kategorie *Wichtigkeit/Vorteile*) und somit die Entwicklung einer „metarepresentational competence“ (n. diSessa (2004),

s. Kap. 3.1) fördern können.

Die Ergebnisse zeigen, dass die LehrerInnen in dieser Erhebung sehr viele Aspekte von Formelverständnis, wie es in Kapitel 6 aus der Theorie abgeleitet wurde, ansprechen (s. Kap. 14.5). Die Art und Weise, wie Formeln angewendet und interpretiert werden, deuten in vielen Punkten auf einen eher technischen Umgang mit Formeln hin. Es findet jedoch auch eine strukturelle Verknüpfung von Formeln als mathematische Ausdrücke mit physikalischen Inhalten statt (s. Kap. 15).

Kritische Reflexion der Ergebnisse mit Blick auf die Methodik der Arbeit: Da es sich bei dieser Arbeit um eine qualitative Studie mit kleiner Stichprobengröße handelt, können keine generalisierbaren Aussagen getroffen werden. Die kleine Stichprobengröße von 10 LehrerInnen und die Fokussierung auf eine Klassenstufe (Klassenstufe 8) und einen thematischen Bereich (elektrischer Widerstand) ermöglichen einen guten Einblick, wie LehrerInnen im Unterricht mit Formeln umgehen. Die Ergebnisse zeigen ein recht breites inhaltliches Spektrum der Aussagen. Das Kategoriensystem kann in vielen Punkten mit der Theorie abgeglichen werden und stellt somit ein gutes Instrument für weitergehende Untersuchungen dar. Inwiefern das Kategoriensystem, die unterschiedliche (quantitative) Gewichtung der Kategorien im beobachteten Unterricht und die Interpretation der Ergebnisse übertragbar auf Physikunterricht im Allgemeinen sind, müsste in weiteren Studien geprüft werden. Auch eine Wertung der Ergebnisse in Hinblick auf einen positiven oder negativen Effekt auf das Formelverständnis von SchülerInnen ist durch diese Untersuchung nicht möglich. Es können lediglich aus der Theorie und dem fachdidaktischen Forschungsstand Ableitungen gemacht werden und die Ergebnisse vor diesem Hintergrund interpretiert werden. Kritisch ist insbesondere auch zu reflektieren, dass viele Aussagen, die durch das Kategoriensystem zusammengefasst werden, im Unterricht nicht explizit auf die betreffenden Formeln bezogen werden. Daher ist es fraglich, ob die Vielfalt der Ergebnisse für SchülerInnen überhaupt in Bezug auf die Entwicklung von Formelverständnis relevant sind, da sie gegebenenfalls keine Verbindung zur Formel herstellen können. Aus diesen Gründen sollen im folgenden Abschnitt Anknüpfungspunkte für weitergehende Untersuchungen aufgezeigt werden.

17. Ausblick

Die hier vorgestellte qualitative Studie wirft verschiedene neue Fragen und Überlegungen auf, die weiterführende Untersuchungen anbieten und lohnenswert erscheinen lassen.

Zum einen kann die Studie auf weitergreifende Untersuchungen ausgeweitet werden, um die Ergebnisse umfassender zu validieren und überprüfen. Einige Kategorien werden in dieser Erhebung nur für einzelne Formeln identifiziert. Beispielsweise kommen die Kategorien *Messprinzip* und *Beschreibung Einheit* nur für die Definitionsformel $R = \frac{U}{I}$ vor. Allgemein werden einige Unterschiede zwischen den betrachteten Formeln festgestellt, die auf erkenntnistheoretische Unterschiede zwischen den Formeln zurückgeführt werden können. Um einen solchen Zusammenhang zwischen dem sprachlichen Umgang mit verschiedenen Formeln und erkenntnistheoretischen Unterschieden zwischen diesen zu verifizieren, ist es notwendig, ähnliche Erhebungen in Bezug auf weitere Formeln zu machen und mit den Ergebnissen dieser Arbeit abzugleichen. So können beispielsweise andere Definitionsformeln und ihre Behandlung im Unterricht betrachtet werden. Hier bietet sich die Formel für den Druck, $p = \frac{F}{A}$, an (mit F ...wirkende Kraft, A ...Fläche, auf die Kraft wirkt) oder die Formel für die (Momentan-)Geschwindigkeit, $v = \frac{s}{t}$ (mit s ...zurückgelegte Strecke t ...verstrichene Zeit). Der Vergleich mit diesen Formeln würde außerdem ermöglichen, Formeln mit gleicher mathematischer Struktur zu vergleichen: eine Größe entspricht jeweils dem Quotienten zweier weiterer Größen. Bei dieser Division zweier unterschiedlicher Einheiten ergibt sich eine neue Einheit. Ein solcher Vergleich könnte generalisierbare Ergebnisse für Formeln dieser spezifischen Struktur ermöglichen.

Abgesehen von einem solchen Vergleich kann allgemein überprüft werden, ob das Kategoriensystem für andere Themenbereiche der Physik als den in dieser Erhebung betrachteten elektrischen Widerstand bereits gesättigt ist, oder ob sich für andere Formeln noch andere Kategorien identifizieren ließen. Aufgrund des Abgleiches mit der Theorie zum Formelverständnis (s. Kap. 14.5) erscheint dies jedoch eher unwahrscheinlich, da das Kategoriensystem bereits fast alle Aspekte von Formelverständnis, die sich aus dem Erkenntnisstand der fachdidaktischen Forschung ergeben, abbildet. Einige Aspekte, die nicht abgedeckt werden, könnten jedoch im Unterricht der Oberstufe, bei

der Behandlung komplexerer Formeln zum Tragen kommen. Hierzu gehören die Zerlegung einer Formel in einzelne Terme und eine zugehörige inhaltliche Betrachtung dieser Terme oder auch ein inhaltlich hergestellter Bezug zu anderen Formeln.

Außerdem bietet es sich aufgrund der unterschiedlichen Lehrpläne der Bundesländer und damit einhergehend unterschiedlicher Stellenwerte von Mathematisierung und Formeln im Physikunterricht an, die Untersuchung auf andere Bundesländer zu übertragen.

Allgemein könnte mit dem nun ausgearbeiteten Codiersystem eine Erhebung mit einer größerer Stichprobe durchgeführt werden. Aus einer solchen Erhebung kann ein Instrument für quantitative Untersuchungen entwickelt werden, mit dem Ziel, Physikunterricht beispielsweise auf die Frage hin zu beschreiben, welche Art von Formelverständnis durch LehrerInnen im praktischen Unterricht fokussiert und vermittelt wird.

Das in dieser Arbeit vorgestellte Ebenenmodell der Versprachlichung von Formeln bietet eine Möglichkeit, die vielfältigen Varianten des Sprechens mit und über Formeln aufzuzeigen. Es wurde bereits in mehreren Lehrerfortbildungen und in der Lehrerbildung an der TU Dresden eingesetzt. Sowohl Studierende als auch LehrerInnen schätzten das Ebenenmodell hierfür grundsätzlich als sinnvoll und hilfreich ein. Ausstehend ist eine Untersuchung, inwiefern das Ebenenmodell wirklich geeignet ist, um LehrerInnen in ihrem unterrichtlichen Handeln zu unterstützen. Diese Frage könnte in Verbindung mit einer forschungsbegleiteten Weiterentwicklung der bestehenden Fortbildungen beantwortet werden.

Da sich diese Erhebung auf zwei Darstellungsformen des Physikunterrichts konzentriert, die verbale Sprache und Formeln, kann auch eine Ausweitung der Fragestellung auf weitere Darstellungsformen, wie sie in Kapitel 3.1 beschrieben und in Kapitel 5.1 (Abb. 5.2) klassifiziert werden, zu weiteren Erkenntnissen führen. Dies erscheint insbesondere relevant, da aus der Theorie heraus auch die Verknüpfung mit mehreren Darstellungsformen als wichtig für das Verständnis einer Darstellungsform (hier der Formel) genannt wird (s. Kap. 3.1 bzw. Kap. 6).

Diese Arbeit legt einen Fokus auf die Perspektive der Lehrenden. Daher stellt sich die Frage, welche Aspekte des Sprechens mit und über Formeln für SchülerInnen verständlich sind und auch bei welchen hier oft als nur implizit mit der Formel verknüpften Aussagen sie überhaupt einen Bezug zu einer Formel erkennen und herstellen können. Außerdem können Schüleraussagen im Unterricht ausgewertet werden, um beispielsweise zu überprüfen, welche Formulierungen sie von ihren LehrerInnen übernehmen oder allgemeiner gesprochen, wie SchülerInnen sprachlich mit Formeln und ihren inhaltlichen Aussagen umgehen, abhängig vom sprachlichen Vorbild der Lehrkraft.

18. Implikationen für den Unterricht

Die Ergebnisse der hier dargestellten Untersuchung lassen verschiedene Überlegungen zu, wie Formeln stärker mit inhaltlicher Bedeutung verknüpft und damit Formelverständnis in einem strukturellen Sinne im Unterricht gefördert werden kann. Hierbei handelt es sich um rein theoretische Überlegungen, deren Wirksamkeit nicht untersucht wurde. Diese Überlegungen bieten somit weitere Anknüpfungspunkte für Folgearbeiten.

Zentrale Erkenntnis dieser Untersuchung ist, dass die beobachteten LehrerInnen sehr viele unterschiedliche inhaltliche Deutungen, Anwendungen und Interpretationen von Formeln beschreiben, diese jedoch oft nicht explizit mit einer Formel verknüpfen. Aus diesem Grund erscheint es sinnvoll, über Methoden nachzudenken, die eine stärkere Verknüpfung von inhaltlichen Aussagen und einer zugehörigen Formel motivieren und den SchülerInnen Übungsmöglichkeiten für eine solche Konstruktion und Verbalisierung von Formelverständnis bieten. Einige methodische Ideen wurden in Janßen und Pospiech (2016b) und Janßen und Pospiech (2016a) vorgestellt. Die Methoden bauen zum Teil auf den von Bagno, Berger und Eylon (2008) entwickelten und erprobten Arbeitsschritten „Interpretation of a formula“ auf und beinhalten neben reinen Verbalisierungen und der Verknüpfung von Formelzeichen mit ihren zugehörigen Termini beispielsweise auch die Ableitung halbquantitativer Aussagen aus Formeln, die sinnvolle Zuordnung von Anwendungsbereichen oder das Identifizieren „falscher“ Aussagen.

Außerdem erscheint es sinnvoll, LehrerInnen generell stärker für eine inhaltliche Behandlung von Formeln und Methoden, die über klassische Rechenaufgaben hinausgehen, zu sensibilisieren. In Kapitel 3.3.4 wurden verschiedene methodische Ansätze präsentiert, die unterschiedliche Aktivitäten mit Formeln beinhalten und somit diesen erweiterten Umgang ermöglichen.

Anhang

Verzeichnis der Anhänge

A. Forschungsinstrumente	305
A.1. Pseudonyme und Alias-Namen	305
A.2. Handreichung für Unterrichtshospitationen	305
A.3. Kurzfragebogen	307
A.4. Transkriptionsregeln	309
B. Analyseinstrumente	311
B.1. Codierleitfaden	311
C. Gütekriterien	328
C.1. InterCoderübereinstimmungen	328
C.2. Intracoderübereinstimmungen	331
D. Veranschaulichungen und Analysen zur Datenauswertung	332
D.1. Beschreibung LehrerInnen	333
D.2. Häufigkeitsanalysen LehrerInnen Kategorie <i>Formel wird gesprochen</i> .	336
D.3. Häufigkeitsanalysen LehrerInnen <i>Formel wird angewendet oder interpretiert</i>	338
D.3.1. Häufigkeitsanalysen LehrerInnen <i>Rechnung</i>	340
D.3.2. Häufigkeitsanalysen LehrerInnen <i>Anwendung oder Experiment</i>	343
D.3.3. Häufigkeitsanalysen LehrerInnen Unterkategorie <i>Beschreibung einzelner Größen</i>	346
D.3.4. Verteilung der Codings <i>Analogie</i> auf LehrerInnen	347
D.3.5. Codehäufigkeiten <i>Zusammenhang zwischen den Größen</i>	348
D.4. Häufigkeitsanalysen LehrerInnen Kategorie <i>Über Formel wird gesprochen</i>	349
D.4.1. Häufigkeitsverteilungen LehrerInnen Unterkategorie <i>Wichtigkeit oder Vorteile einer Formel</i>	352
D.4.2. Häufigkeitsverteilungen LehrerInnen Unterkategorie <i>Erkenntnistheoretische Klassifizierung einer Formel</i>	352
D.5. Häufigkeiten der Ebenen des Ebenenmodells	356

D.6. Ausführliche Zitate	359
D.6.1. Ausführliche Zitate zur Kategorie <i>Rechnung</i>	359
D.6.2. Ausführliche Zitate zur Kategorie <i>Zusammenhang der Größen untereinander</i>	366
D.6.3. Ausführliche Zitate zur Kategorie <i>Anwendung oder Experiment</i>	367
D.6.4. Ausführliche Zitate zur Kategorie <i>Analogie</i>	367
D.6.5. Ausführliche Zitate zur Kategorie <i>Metareflexion über Sprache</i>	368
D.6.6. Ausführliche Zitate zur Kategorie <i>Erkenntnistheoretische Klassifizierung von Formeln</i>	370
D.6.7. Ausführliche Zitate zur Wiederholung von Proportionalitäten aus dem Matheunterricht	372
D.7. Vorkommen der Unterkategorien bei einzelnen LehrerInnen und Formeln	375

A. Forschungsinstrumente

A.1. Pseudonyme und Alias-Namen

Die Speicherung der erhobenen Daten erfolgte ausschließlich unter Pseudonymen, die sich in den Stundenkürzeln widerspiegeln. Diese werden beispielsweise als Quellangaben von Zitaten im Erhebungsteil dieser Arbeit, aber auch im Anhang bei der Analyse der Interdecoderübereinstimmung (Abschnitt C.1) und Intracoderübereinstimmung (Abschnitt C.2) verwendet. Um Zitate und Alias-Namen in jedem Fall zuordnen zu können, werden diese hier aufgeführt:

Kürzel	Alias-Name
ABG	Joachim Jasper
AWR	Anette Berger
BTR	Bea Müller
EPR	Erwin Meyer
HBG	Hans Lenz
KPR	Karl Weber
KTH	Frauke Gerber
LRR	Sabine Carle
SBG	Stefan Funke
SSG	Sebastian Schmitt

In den Transkripten werden SchülerInnen in Sprechhandlungen mit S beziehungsweise bei aufeinander aufbauenden Aussagen mit Nummerierung S1, S2 und so weiter bezeichnet. Werden SchülerInnen von der Lehrkraft mit Namen angesprochen, so findet sich in den Transkripten anstelle des Namens ein „X“. In den Zitaten innerhalb der Arbeit werden den SchülerInnen für eine bessere Lesbarkeit frei erfundene Namen gegeben.

A.2. Handreichung für Unterrichtshospitationen

vor der Stunde:

- Batterien am Umhängemikrofon checken.
- Ersatzbatterien parat haben.
- am Diktiergerät ggf. entsprechenden Ordner wählen.
- Batterie am Smartpen checken.
- genug Papier für Smartpen?
- Kopf des Protokolls vorbereiten: Lehrerkürzel (umkreist), Datum, Zeit der Stunde, Anzahl Schüler (m/w), Stundenthema (mit Smartpen)

zu Stundenbeginn:

- Mikrofon starten.
- hold-Taste am Mikrofon aktivieren.
- Einstellung am Diktiergerät: MIC HI.
- Aufnahme am Smartpen starten (auf Play tippen)

Was wird notiert?

- Lehreraktivität (weist auf etwas, notiert an Tafel...), die nicht / nur schwer aus Tonaufnahme zu identifizieren sind (mit Pfeilen Gestik notieren)
- Sozialform (UG, EA, PA)
- verwendete Medien:
 - interaktive Tafel: IAT
 - Tafel: T
 - Whiteboard: WB
 - Arbeitsblatt: AB
 - Lehrbuch: LB
 - Arbeitsheft: AH (ggf. Seiten nach Stundenende abfotografieren)
- Tafelbild: TB mitschreiben (schrittweise aufbauend)
- synchrone Gestik: mit Pfeilen Handbewegungen
- Wenn über Formel gesprochen wird, Ausrufezeichen notieren, sodass Stelle schneller gefunden werden kann.

nach der Stunde:

- Mikro ausschalten.
- Aufnahme am Smartpen beenden (auf Stopp tippen).

A.3. Kurzfragebogen



S-ID: _____
L-ID: _____

Fakultät Mathematik und Naturwissenschaften, Fachrichtung Physik, Professur Didaktik der Physik

Liebe Physiklehrerin, Lieber Physiklehrer,

Vielen Dank, dass Sie mich bei meiner Forschung unterstützt haben. Als letzte Information benötige ich noch einige allgemeine Angaben von Ihnen und die stichwortartige Beantwortung der beigefügten Fragen. Das Ausfüllen dieses Kurzfragebogens sollte erfahrungsgemäß nicht mehr als 10 bis maximal 15 Minuten beanspruchen und dient der Vorbereitung des Interviews.

Bitte bringen Sie den Fragebogen ausgefüllt zum Interviewtermin mit. Wenn Sie Interesse an den Ergebnissen meiner Arbeit haben, können Sie mir gerne eine E-Mail schreiben, dann lasse ich Ihnen nach der Auswertung meine Dissertation zukommen.

Viele Grüße,
Wiebke Janßen

1. Sind Sie männlich oder weiblich?
☐ männlich ☐ weiblich
2. In welchem Jahr sind Sie geboren?

3. Welchen Studienabschluss haben Sie erworben?
☐ Lehramt an Grundschulen
☐ Lehramt an Mittelschulen
☐ Lehramt an Gymnasien
☐ kein Lehramtsexamen
☐ sonstiges: _____
4. Wie viele Jahre sind Sie im Schuldienst?
_____ Jahre
5. Welche Unterrichtsfächer haben Sie studiert? (In der Reihenfolge des Studienumfangs)
1. _____
2. _____
3. _____
4. _____
6. Welche Fächer unterrichten Sie? (In der Reihenfolge des Stundenumfangs)
1. _____
2. _____
3. _____
4. _____

7.	Haupt-/Real-schule	Gymnasium		
		SEK I	SEK II	
a) Wie viele Wochenstunden unterrichten Sie zurzeit?				
b) Mit wie vielen Wochenstunden Physik?				
c) Wie viele Jahre unterrichten Sie die hospitierte Klasse bereits in Physik? _____ Jahre				
d) Unterrichten Sie die hospitierte Klasse zurzeit auch in anderen Fächern? ☐ ja, in _____ ☐ nein				

8. Beschreiben Sie bitte kurz, warum und wofür Formeln wichtig sind ...
- a) in der Physik

 - b) im Physikunterricht
9. Nennen Sie bitte typische Aufgaben, die **Schüler** mit Formeln lösen müssen und welche typischen Tätigkeiten Sie als **Lehrer** mit Formeln im Unterricht machen.
- a) im Physikunterricht

 - b) in Leistungskontrollen

 - c) in Hausaufgaben
10. Erläutern Sie bitte, wie man aus Ihrer Sicht Schülern die inhaltliche Bedeutung von Formeln näherbringen kann.
11. Beschreiben Sie kurz, welche Fertigkeiten und Fähigkeiten Schüler in Bezug auf Formeln erwerben sollten.

A.4. Transkriptionsregeln

Transkriptionsregeln

- Es wird wörtlich transkribiert. Dialekte werden ins Hochdeutsche übertragen, z.B. wird Sächsisch „ni“ zu nicht. Wenn keine eindeutige Übersetzung möglich ist, wird der Dialekt beibehalten.
- Wortverschleifungen werden an die schriftliche Sprache angenähert. Beispiel: „Einma ham wir das gemacht“ wird zu „Einmal haben wir das gemacht.“
- Die Satzform wird beibehalten, auch syntaktische Fehler werden wörtlich transkribiert.
- Wort- oder Satzabbrüche werden mit dem Abbruchzeichen / gekennzeichnet. Beispiel: „Das ist mir/ Das ist mir schon wichtig.“
- Interpunktion orientiert sich an den Sinneinheiten von ganzen Sätzen und nicht ausschließlich an der Sprachmelodie.
- Sprechpausen werden durch (...) gekennzeichnet. Ist die Pause länger als 5 Sekunden wird die Dauer der Pause in Klammer notiert (6 s)
- Verständnissignale („mhm“, „ja“, „aha“, ...) werden nicht transkribiert.
- Rückspiegelndes „ne?“ wird nicht transkribiert.
- Besonders betonte Worte werden durch GROSZBUCHSTABEN gekennzeichnet.
- Jeder Sprecherbeitrag erhält einen eigenen Absatz, einzelne Beiträge werden durch eine Leerzeile getrennt.
- Unverständliche Worte werden mit (unv.) gekennzeichnet, undeutliche Aussagen, deren Verständnis nicht sicher ist, werden in Klammern mit Fragezeichen transkribiert (Schulaufsichtsbehörde?).
- Störungen oder nonverbale Handlungen werden in eckigen Klammer notiert [Lachen], [Pausenklingeln]

Hinweise zu datenschutzrechtlichen Regelungen:

- Namen werden nicht transkribiert.
- Ruft ein Lehrer einen Schüler auf, wird der Name als „X“ transkribiert.

- Spricht ein Schüler, wird dieser als S: transkribiert, sprechen zwei unterschiedliche Schüler nacheinander, wird durchnummeriert S1: S2: ...
- Lehrersprechhandlungen werden mit L: eingeführt
- Schülerantworten werden, soweit sie zu verstehen sind, transkribiert. Wenn sie unverständlich sind, wird sinngemäß transkribiert und in Klammern gesetzt

Hinweise zur einheitlichen Schreibweise:

- Zeichen, Formeln und Abkürzungen werden ausgeschrieben, wie sie gesprochen werden (Prozent, zum Beispiel, Meter, mal, durch ...).
- Gesprochene Buchstaben werden als solche notiert (F, m), in ihrer Groß- und Kleinschreibung orientieren sie sich an den Formelzeichen, die sie beschreiben. Werden in anderem Kontext Buchstaben genannt, werden diese immer groß geschrieben.
- Zahlen von 1-12 werden ausgeschrieben (eins, zwei ...), ebenso weitere Zahlen mit kurzen Namen (zwanzig, hundert, dreitausend...).
- Andere Zahlen und Dezimalzahlen werden in Ziffern notiert (421).
- Wortverkürzungen werden so notiert, wie sie gesprochen werden („runtergehen“, „mal“).
- Redewendungen/Idiome werden wörtlich transkribiert, z.B. „übers Ohr hauen“

Beispieltranskript

00:01:29-0 Befragter: Also ich versuche eigentlich bis / bis zum Halbjahr Klasse Acht den Formeln aus dem Weg zu gehen. Wenn es nicht anders geht, wie bei R gleich U durch I , dann ist das OK, aber ansonsten versuche ich, dem aus dem Weg zu gehen, weil ich den Eindruck habe, für unser Schülerklientel ist das einfach zu abstrakt. Deswegen versuche ich immer, den Weg über das inhaltliche Lösen von Aufgaben zu gehen. Sowohl in Klasse Sechs, wenn es um die Dichte geht oder Geschwindigkeit, Klasse Sieben ist das gleich. Was gibt es da? Da waren die kraftumformenden Einrichtungen, Hebelgesetze und sowas. Also dann versuche ich es eigentlich möglichst INHALTLICH zu machen, damit A der Schüler weiß: Was mache ich wirklich? Ich muss wissen, wie es funktioniert und dann komme ich auch zum Ziel. Und die Formeln sind denen einfach zu abstrakt. Wir merken das ja immer wieder das/ gibt es dann Probleme: Was ist ein Formelzeichen? Was ist eine Einheit? Was VERBIRGT sich hinter einem Formelzeichen

für eine Größe? Und da denke ich mir, ist es vielleicht vom Schüler so bis zur Mitte, irgendwann kommt ja der Punkt, wo es eh nicht mehr ohne geht. Also wenn ich dann hier, was weiß ich, Weg-Zeit-Gesetz in Klasse Neun, da brauche ich inhaltlich eher nicht mehr anfangen. Aber bis dahin versuche ich dem eigentlich aus dem Weg zu gehen, einfach, dass der Schüler ein Erfolgserlebnis hat.

00:02:59-6 Interviewer: Können Sie das etwas genauer beschreiben, was diesen Punkt ausmacht, dass es nicht mehr ohne GEHT? (...) Liegt das am Lehrplan oder ist das was Fachimmanentes, wie würden Sie das ?

00:03:13-7 Befragter: Na, im Grunde genommen geht es ja nicht ohne, um durch die Prüfung zu kommen. Also wenn die jetzt die schriftliche Prüfung in Physik wählen, sind sie mehr oder weniger gezwungen wahrscheinlich früher oder später auf so eine Formel zurückgreifen zu MÜSSEN. (unverständlich) die Stresssituation in der Prüfung kommt, dann ist das einzige Hilfsmittel, was sie haben, das Tafelwerk, da stehen halt nur Formeln drin. Also man wird / der Schüler wird nicht umhin kommen. Aber ich glaube, dass der so mit vierzehn, fünfzehn dann wahrscheinlich auch irgendwann diese Routine entwickelt hat, auch in Zusammenarbeit mit Matheunterricht, dass er dann eben halt auch weiß, was so eine Formel MACHT. Und im Notfall kann er eben, auch wenn es nicht unbedingt das ist, was ich mir VORSTELLE, das formal abarbeiten.

B. Analyseinstrumente

B.1. Codierleitfaden

Codierleitfaden

zum Promotionsprojekt
„Formeln und Sprache“
Wiebke Kuske-Janßen

Promotionsvorhaben Wiebke Kuske-Janßen, Codierleitfaden

allgemeine Hinweise an Codierer:

- Grundsätzlich wird nur die Sprache des Lehrers codiert
- In der Regel werden keine Schüleraussagen und auch keine Unterrichtsschritte codiert
- Wenn der Lehrer einen Satz beginnt, in den SchülerInnen nur 1 oder wenige Worte einfügen (Ellipse als implizite Fragestellung), werden auch Schüleraussagen mit codiert.
- Doppelcodierungen, Überlappungen und Verschachtelungen der Codierungen sind möglich (Beispiel s.u.)
- Die Codiereinheit richtet sich nach verständlichen Sinneinheiten und kann in Gesprächssituationen auch Schülerantworten umfassen.
- Das Kategoriensystem ist hierarchisch geordnet. Kann eine Aussage in keine Kategorie der untersten Gliederungsebene eingeordnet werden, wird sie in die jeweilige nächst höhere Ebene eingeordnet. Im Codierleitfaden spiegelt sich dies im Layout der Überschriften wider: höchste Ebene = fett, Unterebene = normal, zweite Unterebene = kursiv.
- Die Aussagen müssen einzelnen Formeln zugeordnet werden. Jede Formel bildet eine Kategorie auf höchster Ebene, für jede Formel gibt es die nachfolgend beschriebenen Kategorien. Die im Kategoriensystem mit Punkten umrandeten Kategorien tauchen nur bei der angegebenen Formel auf.

Beispiel (ABG1, 121):

Wir haben einfach noch mal diese strom- und spannungsrichtige Messschaltung, die man sich jedes mal überlegen muss, noch mal hier mit ERWÄHNT. (...) Ok, fassen wir noch mal ganz kurz zusammen. Mit Hilfe also dieser Gleichung, U durch I , also Spannung geteilt durch Stromstärke, kann ich die Widerstandswerte der entsprechenden Bauelemente bestimmen und kann daraus dann schlussfolgern, was im Stromkreis mit dem Stromfluss passiert. (...) In dem Moment, wenn ich einen HOHEN Widerstandswert habe, wird der Stromfluss mehr behindert, als wenn ich einen kleinen Widerstandswert habe. (...) Sollte ich in einem Bau / in einem Stromkreis zwei unterschiedliche Glühlampen mit unterschiedlichen Widerstandswerten verwenden, führt das eben dazu, dass in dem Falle eine Glühlampe leuchtet und die andere NICHT. Obwohl mal eigentlich bei einer Reihenschaltung erwartet, dass immer beide leuchten müssen. Es sind eigentlich wirklich nur diese / oder es sind diese Eigenschaften des elektrischen Widerstandes, die das ganze beeinflussen. Okay, das erst mal bis hier her .

alle Codierungen beziehen sich auf die Formel $R=U/I$

Anwendung / Experiment - erklärt (komplette Stelle)

III-Formelsatz mit Termin (inkl. pink)

II-B-Formelsatz mit Formelzeichen

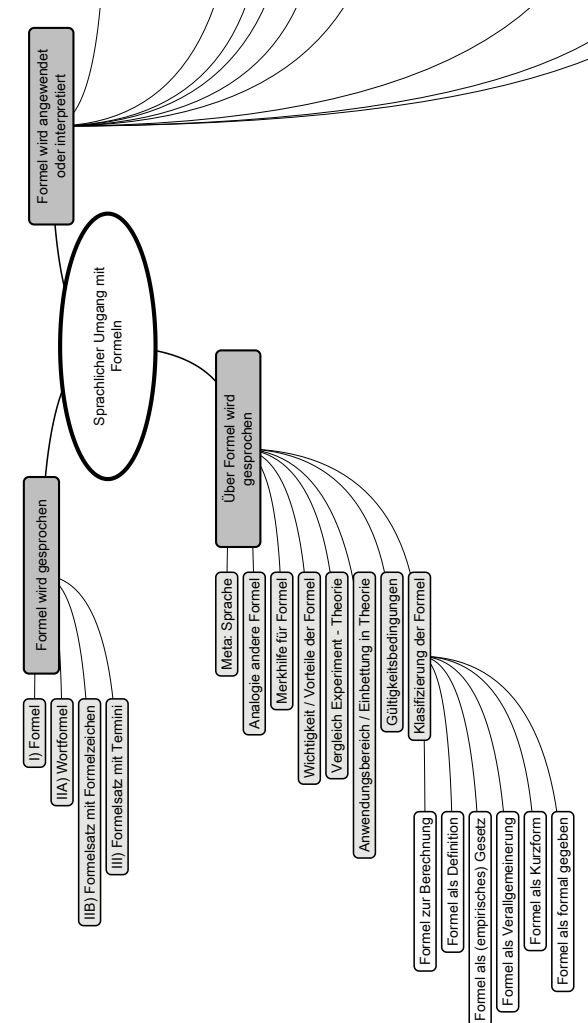
Messprinzip (inkl. rot & pink)

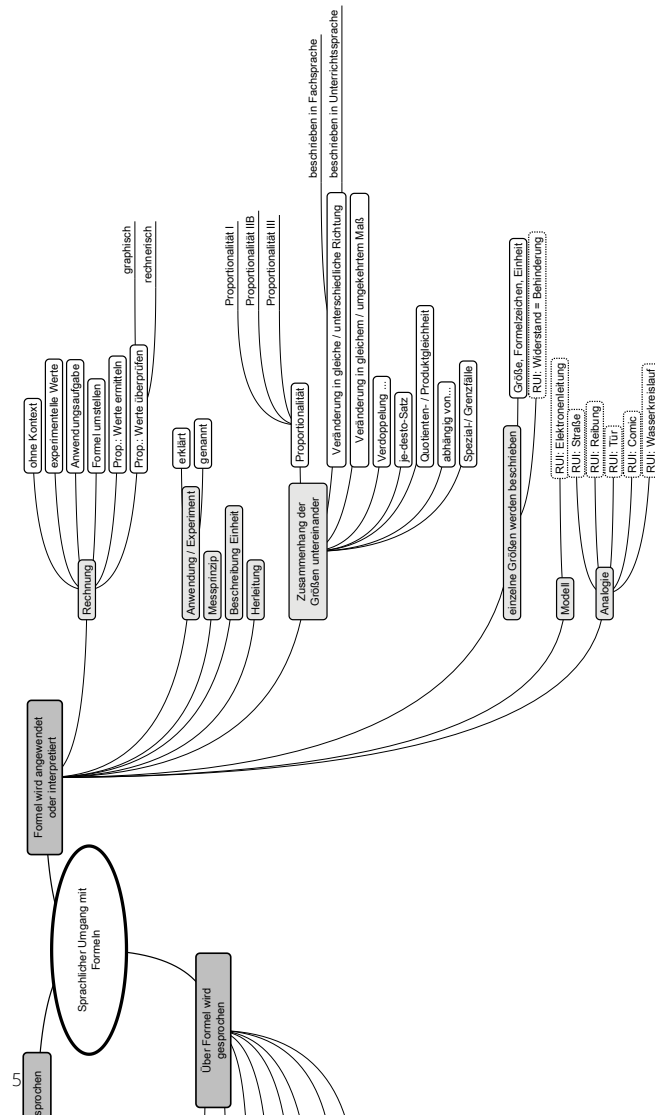
Veränderung in gleiche/untersch. Richtung - Unterrichtssprache (inkl. blau)

einzelne Größen werden beschrieben - R: Behinderung

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
FORMEL WIRD GESPROCHEN	6
FORMEL WIRD ANGEWENDET ODER INTERPRETIERT.....	9
Rechnung	9
Anwendung/Experiment	13
Messprinzip	16
Beschreibung Einheit	16
Herleitung	17
Zusammenhang der Größen untereinander	17
<i>Proportionalität</i>	18
<i>Veränderung und gleiche / unterschiedliche Richtung</i>	19
<i>Veränderung in gleichem / umgekehrtem Maß</i>	20
<i>Verdoppelung...</i>	20
<i>je-desto-Satz</i>	20
<i>Quotienten- / Produktgleichheit</i>	21
<i>abhängig von...</i>	21
<i>Spezial-/Grenzfälle</i>	21
Einzelne Größen werden beschrieben	22
Modell	22
Analogie	24
ÜBER FORMEL WIRD GESPROCHEN	26
Meta: Sprache	26
Analogie andere Formel	26
Merkhilfe für Formel	27
Wichtigkeit / Vorteile der Formel	27
Vergleich Experiment / Theorie	28
Anwendungsbereich / Einbettung in Theorie	28
Gültigkeitsbedingungen	29
Klassifizierung der Formel	29





FORMEL WIRD GESCHRIEBEN ODER GESPROCHEN

I) Formel Größe

Wird codiert, wenn ...die Formel schriftlich notiert wird.

Ankerbeispiel  (SBG_TB_1)

Wird auch codiert, wenn ...die Formel für eine konkrete Rechnung angeschrieben wird. ...eine andere Formel in die Grundformel eingesetzt wurde.

Wird nicht codiert, wenn ...mathematische Zeichen verbalisiert werden. Dann → IIB
...einzelne gegebene Größen in einer Rechnung notiert werden (z. B. U=10V)

I) Formel Größe umgestellt

Wird codiert, wenn ...die Formel in umgestellter Form schriftlich notiert wird.

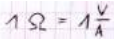
Ankerbeispiel  (SBG_TB_1)

Wird auch codiert, wenn ...die umgestellte Formel für eine konkrete Rechnung angeschrieben wird.

Wird nicht codiert, wenn ...mathematische Zeichen verbalisiert werden. Dann → IIB

I) Formel Einheit

Wird codiert, wenn ...ein Ausdruck für die Verknüpfung der Einheiten einer Größe mit den entsprechenden Einheiten der anderen Größen in der Formel schriftlich notiert wird.

Ankerbeispiel  (AWR_TB_1)

Wird auch codiert, wenn ... die Einheiten nicht mit einem Gleichzeichen verknüpft sind
...keine Maßzahl vor den Einheiten notiert wird ($\Omega = V/A$)

IIA) Wortformel

Wird codiert, wenn ...die Formel mit Termini anstelle der physikalischen Formelzeichen notiert wird.

Ankerbeispiel $\text{Widerstand} = \frac{\text{Spannung}}{\text{Stromstärke}}$ (HBG_TB_1)

Wird auch codiert, wenn ...nur ein Teil der Formelzeichen übersetzt wird (*Widerstand=U/I*).

IIB) Formelsatz mit Formelzeichen Größe

Wird codiert, wenn ...die Formel mit physikalischen Formelzeichen gesprochen oder als Satz geschrieben wird.

Ankerbeispiel *R ist gleich U durch I.* (LRR5,124)

Wird auch codiert, wenn ... die Formel nur unvollständig gesprochen wird (*Den Quotienten U durch I berechnet.* (AWR3,27)).
... einzelne Fachtermini ausgesprochen werden (*R gleich Spannung durch Stromstärke*).
...eine andere Formel in die Grundformel eingesetzt wurde (*U-eins durch U-zwei durch I.* (HBG5,29))

Wird nicht codiert, wenn ... die Formel in umgestellter Form mit physikalischen Formelzeichen gesprochen oder als Satz geschrieben wird. Dann → IIB umgestellt

IIB) Formelsatz mit Formelzeichen Größe umgestellt

Wird codiert, wenn ...die Formel in umgestellter Form mit physikalischen Formelzeichen gesprochen oder als Satz geschrieben wird.

Ankerbeispiel *U ist gleich R mal I.* (ABG1,106)

Wird auch codiert, wenn ... die Formel nur unvollständig gesprochen wird (*Bruchstrich U durch R.* (ABG1,106)).
... einzelne Fachtermini ausgesprochen werden (*Spannung gleich R mal I*).

IIB) Formelsatz mit Formelzeichen Einheit

Wird codiert, wenn ...ein Ausdruck, der Einheiten miteinander verknüpft, oder ein Teil davon mit Benennung der Buchstaben statt der Einheiten gesprochen oder als Satz geschrieben wird.

Ankerbeispiel *V durch A.* (BTR2,340)

III) Formelsatz mit Termini Größe

Wird codiert, wenn ... alle physikalischen und mathematischen Formelzeichen in der Formel durch fachsprachliche Wörter ersetzt werden.

Ankerbeispiel *elektrischer Widerstand gleich Spannung am Bauelement durch die Stromstärke.* (LRR5,124)

Wird auch codiert, wenn ... in der Formel Formelzeichen und zugehörige Termini kombiniert verwendet werden (*Der Widerstand R...*).

... die Formelzeichen unmittelbar vor oder nach der Verwendung der Formel mit den entsprechenden Fachtermini verknüpft werden (*FORMELZEICHEN der Spannung ist U, der Stromstärke I. U durch I.* (HBG2,24)).
Bemerkung: In diesem Fall wird *U durch I* zusätzlich mit IIB codiert.

... nur ein Teil der Formel gesprochen wird (*Gleichung, U durch I, also Spannung geteilt durch Stromstärke* (ABG1,121)).
Bemerkung: In diesem Fall wird *U durch I* zusätzlich mit IIB codiert.

Wird nicht codiert, wenn ... einzelne Größen nur mit Formelzeichen gesprochen werden (*So der Widerstand hat die Formel: R ist gleich U durch I.* (AWR4,182)).
Dann → IIB
...nur einzelne Größen angegeben werden. (*R sind 30 Ohm*)

III) Formelsatz mit Termini Einheit

Wird codiert, wenn... ... die Verknüpfung der zur Formel gehörigen Einheiten als Satz formuliert wird.

Ankerbeispiel *So wir haben Volt durch Ampere festgelegt als Ohm.* (LRR5,218)

Wird auch codiert, wenn... ... eine Maßzahl vor die Einheiten gesetzt wird.

... nur ein Teil des Ausdrucks gesprochen wird (*Was heißt ein Volt durch Ampere?* (SSG3,90)).

Wird nicht codiert, wenn... ... die Einheit physikalisch interpretiert wird (*Das heißt wie viel Volt brauche ich, um ein Ampere aufzubringen.* (SSG4,62)).
Dann → Beschreibung Einheit

... die Einheitenentsprechung innerhalb einer Rechnung gesprochen wird (*Zwei Volt durch ein Ampere sind zwei Ohm.*) Dann → Rechnung

FORMEL WIRD ANGEWENDET ODER INTERPRETIERT

Rechnung	
Wird codiert, wenn	... die Formel für eine konkrete Rechnung genutzt wird.
Ankerbeispiel	Eine Beispielrechnung wäre, (7 s) mal was ganz einfaches, was auch jeder im Kopf machen kann. Wir haben eine Spannung von zwei Volt und eine Stromstärke von ein Ampere. Gleichung haben wir rechts aufgeschrieben. (5 s) Wir würden einfach die zwei Volt durch ein Ampere teilen und kämen auf WAS für einen Widerstand? (6 s) X! SS: Zwei Ohm L: Genau. (HBG2,36-38)
Wird auch codiert, wenn	... eine Berechnung verbalisiert wird. (Dann vier Volt durch zwei Ampere sind zwei Ohm. (HBG2,118)) ...der Lehrer die Aufgabenstellung für die Rechnung gibt und die SchülerInnen im Anschluss rechnen müssen. (Wie sieht es denn aus, wenn ich ein Bau/ Bauelement habe mit zwölf Volt und ich habe eine Stromstärke von Zweihundert Milliampere ermittelt. (LRR6,18)) ... eine Rechnung an der Tafel notiert wird. (AWR_TB_1)
Wird nicht codiert, wenn	... der Bezug zur Formel nicht mehr vorhanden ist.
Bemerkung	Die Formel selbst wird in geschriebener oder gesprochener Form für sich stehend zusätzlich in Kategorie I/IIA oder IIB/III eingeordnet. Je nach Kontext ist die Aussage ggf. in eine der Subkategorien von Rechnung einzuordnen. Teilrechnungen können z. T. unterschiedlichen Formeln zugeordnet werden, z. B. wenn innerhalb einer Rechnung zum Widerstandsgesetz der Widerstand über $R=U/I$ berechnet wird.

Rechnung – ohne Kontext	
Wird codiert, wenn	... die Formel für eine konkrete Rechnung ohne Kontext genutzt wird.
Ankerbeispiel	Eine Beispielrechnung wäre, (7 s) mal was ganz einfaches, was auch jeder im Kopf machen kann. Wir haben eine Spannung von zwei Volt und eine Stromstärke von ein Ampere. Gleichung haben wir rechts aufgeschrieben. (5 s) Wir würden einfach die zwei Volt durch ein Ampere teilen und kämen auf WAS für einen Widerstand? (6 s) X! SS: Zwei Ohm L: Genau. (HBG2,36-38)
wird auch codiert, wenn	...zwar ein Kontext genannt wird, dieser aber keinen expliziten Anwendungs- oder Alltagsbezug hat. Bsp.: Wir haben EINEN Leiter, der einen Millimeter, sondern Meter lang ist. (8 s) Unsere Querschnittsfläche ist ein Quadratmillimeter (...) und wir haben eine (...) Leitung aus, was nehmen wir, mal Kupfer (...) Was würden wir jetzt als spezifischen Widerstand für Kupfer hinschreiben, X? (...) Genau. (...) IN die Tabelle gucken. (10 s) Wenn wir unseren (...) Widerstand suchen, (19 s) dann (...) kann ich einfach meine Größen einsetzen. (44 s) Und das auszurechnen ist kein Problem. (HBG3,135)
Rechnung – experimentelle Werte	
Wird codiert, wenn	...die Formel genutzt wird, um einen Widerstand mit konkreten Werten aus einem Experiment zu berechnen.
Ankerbeispiel	Okay. Wir drehen mal zunächst hoch auf ungefähr zwei Volt. (...) Was wird uns für eine Stromstärke bei ungefähr zwei Volt angezeigt? Also GROB gerundet. Es reichen uns jetzt ganz grobe Werte. 0,1. (...) Der Widerstand, mal im Kopf ausgerechnet, ist ungefähr wie groß? Zwei Volt durch 0,1 Ampere? (HBG2,137)
Wird nicht codiert, wenn	...die Werte nicht im Realexperiment gemessen, sondern einem hypothetischen Experiment zugeordnet und ohne Messung gegeben werden. Dann → Rechnung – Anwendungsaufgabe ...Werte auf Proportionalität hin überprüft werden. Dann → Rechnung – Prop: Werte überprüfen.

Rechnung – Anwendungsaufgabe	
Wird codiert, wenn	... ein Alltagsbeispiel oder ein anderer konkreter Kontext für eine Rechnung genutzt wird.
Ankerbeispiel	<i>Der Übergangswiderstand am menschlichen Körper von Hand zu Fuß kann mit etwa zwei Kiloohm angenommen werden. Dreißig Milliampere können bereits lebensgefährlich sein. Was folgt aus diesen Zahlenangaben für die zulässige Berührungsspannung? (SSG4,125)</i>
wird nicht codiert, wenn	...der Kontext keinen expliziten Anwendungs- oder Alltagsbezug hat (z. B. nach einem Draht mit einem bestimmten Widerstand gesucht wird). Dann → Rechnung – ohne Kontext
Rechnung – Formel umstellen	
Wird codiert, wenn	...die Formel umgestellt wird.
Ankerbeispiel	<i>Auf beiden Seiten mal I, dann haben wir auf der einen I mal R stehen, auf der anderen U durch I mal I und die Stromstärke kürzt sich auf dieser Seite raus. (HBG2,43)</i>
Wird auch codiert, wenn...	...nur thematisiert wird, dass die Formel umgestellt werden muss, ohne dass explizit die nötigen Rechenschritte angesprochen werden. (<i>Ich habe jetzt voraus gesetzt, dass ihr mit euren mathematischen Kenntnissen von alleine die Formel R ist gleich U durch I umstellen könnt. (AWR4,215)</i>) ...verschiedene Formeln ineinander eingesetzt werden. (<i>Und damit habe ich das R des / für den Wert (im Widerstandsgesetz?) und kann das dann nach L umstellen, weil ich dieses R hier einsetzen kann. (ABG6,41)</i>)
Bemerkung	Innerhalb der markierten Textstelle wird die Formel selbst doppelt codiert (Ebenen I/IIA und IIB/III).
Rechnung – Prop: Werte ermitteln	
Wird codiert, wenn	...mit Hilfe der proportionalen Zusammenhänge in einer Formel Größen ermittelt werden.
Ankerbeispiel	<i>Also. Wie groß wäre denn der Widerstand, wenn ich jetzt statt/ das ist jetzt kein ein Meter Draht aber ung/ wenn das einer wäre. Wenn ich jetzt statt einem Meter eben plötzlich ZWEI Meter nehme? (BTR6,96)</i>
Wird nicht codiert, wenn	...keine konkreten Werte ermittelt werden, sondern nur erwähnt wird, dass sich eine Größe bspw. verdoppelt, wenn sich eine andere verdoppelt. Dann → Zusammenhang der Größen - Verdoppelung...

Rechnung – Prop: Werte überprüfen	
Wird codiert, wenn	...überprüft wird, ob sich zwei Größen proportional zueinander verhalten.
Ankerbeispiel	<i>Aus einem Meter mach ich zwei Meter und der elektrische Widerstand ist fast das Doppelte, ein bisschen mehr sogar. Jetzt gucken wir mal acht und 25. (...) Was stellen wir denn da fest? (4s) Aus einem Meter mache drei Meter. Aus acht wird 25. (KPR7,36)</i>
Bemerkung	Wenn Abweichungen der überprüften Werte gewertet werden (z. B. auf Messungenauigkeiten zurückgeführt werden), dann wird dies zusätzlich mit → Über Formel wird gesprochen – Über die Formel – Vergleich Experiment & Theorie codiert.
Rechnung – Prop: Werte überprüfen graphisch	
Wird codiert, wenn	...anhand konkreter Werte überprüft wird, ob sich zwei Größen proportional zueinander verhalten.
Ankerbeispiel	<i>Also man könnte die Messwertpaare ins Diagramm einzeichnen, ich wiederhole noch einmal. Und wenn dann die Punkte auf einer Geraden durch den Koordinatenursprung liegen, dann hätte man auch einen Nachweis dafür, dass das Ohmsche Gesetz gilt. (BTR2,105)</i>
Rechnung – Prop: Werte überprüfen rechnerisch	
Wird codiert, wenn	...anhand konkreter Werte überprüft wird, ob sich zwei Größen proportional zueinander verhalten.
Ankerbeispiel	<i>Aus einem Meter mach ich zwei Meter und der elektrische Widerstand ist fast das Doppelte, ein bisschen mehr sogar. Jetzt gucken wir mal acht und 25. (...) Was stellen wir denn da fest? (4s) Aus einem Meter mache drei Meter. Aus acht wird 25. (KPR7,36)</i>
Wird nicht codiert, wenn	...Werte für das Ohmsche Gesetz überprüft werden, indem der Quotient U/I gebildet wird. Dann → RUI-Rechnung-ohne Kontext

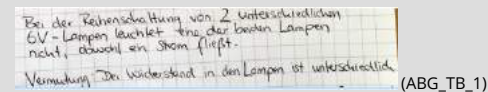
Anwendung / Experiment – erklärt	
Wird codiert, wenn...	... der Zusammenhang zur Beschreibung oder Erklärung eines Experimentes / eines hypothetischen Experimentes / einer Anwendung genutzt wird.
Ankerbeispiel	<i>Ich habe hier vorne einen Stromstärkemesser, der verbunden ist mit einem Leiterbrettchen (...). Ich schalte jetzt ein und/ Oder andersrum: Ich baue nacheinander zwei verschiedene Bauelemente ein und ich möchte gerne von euch wissen: Welches Bauelement hat den größeren Widerstand? Okay. Das war das erste Bauelement (...) und jetzt haben wir das zweite Bauelement. Welches von den beiden Bauelemente hat der größeren Widerstand? (AWR4,135)</i>
Wird auch codiert, wenn...	... mit einem Experiment der Zusammenhang zwischen den Größen verdeutlicht wird. (Ja, in dem Fall 0,1 ist fast bei 0,2 also 0,16 sowas, 0,15; 0,16 Ampere wäre jetzt hier der Stromfluss. Frage: Wie groß ist die Spannung, die am Widerstand anliegt? (38 s) Wir wissen in einem Stromkreis ist ein Widerstand mit dem Widerstandswert 51 Ohm verbaut. (ABG1,93)) ... mit einer Anwendung der Zusammenhang zwischen den Größen verdeutlicht wird. (Und zwar wenn ihr euch diese schönen dicken KABEL hier anguckt (...) mit denen ihr (...) die Bauteile verbindet, (...) dann merkt ihr ja, dass diese Kabel anscheinend KAUM Einwirkungen haben oder Auswirkungen haben auf die Widerstandsmessung. Da könnt ihr ein langes Kabel nehmen, da könnt ihr ein kurzes Kabel nehmen, die haben anscheinend keinen Beitrag irgendwie zum Widerstand. (...) Das liegt zum einen daran das sie natürlich relativ kurz SIND, (...) das liegt zum anderen daran, dass sie anscheinend aus einem ziemlich günstigen Material sind, das sind nämlich Kupferdrähte und Kupfer hat nämlich auch einen sehr, sehr kleinen Widerstand. (SSG7,69)) ... der (halb-quantitative) Zusammenhang implizit genutzt wird, um ein Experiment zu erklären (Wundert mich, dass das so wenig ist, was hier durchfließt. (15 s) Mikroampere heißt das. Da brauchen wir anscheinend eine Spannungsquelle, die bisschen mehr drauf macht. Anscheinend hat der Draht doch einen höheren Widerstand, als ich dachte. Gut, ich hab es natürlich leider nicht vorher aufgebaut. Hab es, wie gesagt, ich gebe es zu, ich hab das dieses mal einfach vergessen. Da brauchen wir eine Spannungsquelle, die ein bisschen mehr Bums hat. (SSG4,140)) ...die Schüler aufgefordert werden, ein Experiment mit Hilfe des Zusammenhanges zu erklären. (L: So, versuch jetzt mal ein bisschen Interpretation hier rein zu kriegen. Was HEISZT denn das? (...) Steigende Spannung und trotzdem wird die Stromstärke geringer. (SSG4,186))

Wird nicht codiert, wenn...	... ein Widerstand aus einem Experiment berechnet wird, ohne dass das Experiment erklärt wird. Dann → Rechnung ...nur einzelne Größen benannt werden (z.B. dickes Kabel), ohne dass ein halbquantitativer Zusammenhang zwischen ihnen für die Erklärung genutzt wird, dann → Anwendung / Experiment - genannt
Bemerkung	Teilaussagen können häufig mit Zusammenhang der Größen untereinander doppelcodiert werden.

Anwendung / Experiment – genannt	
Wird codiert, wenn	...eine Anwendung (z. B. ein technisches Gerät oder ein Experiment) beschrieben wird, für deren Verständnis der in der Formel dargestellte Zusammenhang relevant ist, ohne dass explizit erklärt wird, wie sich die Größen hier verhalten.
Ankerbeispiel	<i>Aber wir sehen mal diesen Effekt, dass also wirklich SEHR, SEHR lange Kabel für den Stromkreis ungünstig sind, weil eben entsprechende Verluste auftreten. Im ganz KLEINEN hat das eben auch die Bedeutung, wenn wir jetzt an unsere Schülerexperimente denken, unsere Experimentierkästen, da haben wir ja auch immer gesagt, bei der Verbindung der Schalt oder Steckbrettchen möglichst kurze Kabel verwenden, keine langen Kabel, weil eben die Verluste der langen Kabel einfach zu groß sind. (ABG6,54)</i>
Wird auch codiert, wenn	...bei $R=U/I$ von Spannungsabfall am Widerstand, Stromstärkebegrenzung durch einen Widerstand (Widerstand als Schutz) oder von einer zulässigen Maximalspannung gesprochen wird. (Und tatsächlich ist eben die Begründung hier, dass eben auch diese ganzen Übergänge einen Widerstand darstellen und demzufolge dort auch Antrieb der Ladungsträger mit verloren geht. (ABG1,121)) ... beim Widerstandsgesetz beschrieben wird, wie ein Kabel beschaffen sein sollte oder die Qualität eines Leiters beurteilt wird (ohne dass dies wirklich mit der Formel ausführlich begründet wird.) (bei der Verbindung der Schalt oder Steckbrettchen möglichst kurze Kabel verwenden, keine langen Kabel, weil eben die Verluste der langen Kabel einfach zu groß sind. (ABG6,54))

...ein Experiment beschrieben oder durchgeführt wird, mit dem der Zusammenhang von Größen untersucht wird. (Wir werden ZWEI verschiedene Materialien für den Draht benutzen und zwar einmal Konstantan und einmal Messing. So, BEIDE haben eine Länge von einem Meter und einen (...) Durchmesser von 0,5 Millimeter, das sind nur Randnotizen, braucht ihr nicht aufschreiben. (...) X, du liest die Werte ab. (...) Stromstärke, Messbereich ein Ampère. (...) Spannung, Messbereich ein Volt.(SBG5,18))

... mit Hilfe der Formel eine Vermutung für ein Experiment aufgestellt wird, ohne dass dies näher erklärt wird.



Bei der Reihenschaltung von 2 unterschiedlichen 6V-Lampen leuchtet eine der beiden Lampen nicht, obwohl ein Strom fließt. Vermutung: Der Widerstand in den Lampen ist unterschiedlich. (ABG_TB_1)

Wird nicht codiert, wenn

...mit konkreten Zahlen argumentiert wird. Dann → Anwendung / Experiment erklärt oder Rechnung

...explizit mit den in der Formel vorkommenden Größen argumentiert wird (z. B. die optimale Beschaffenheit eines Drahtes mit den Größen Länge, Querschnitt, beschrieben und mit den Zusammenhängen von R, U und I diskutiert wird. Dann → Anwendung / Experiment erklärt

...nur der Aufbau zur Messung in der Formel vorkommenden Größen beschrieben wird.

Bemerkung

Teilaussagen können häufig mit Zusammenhang der Größen untereinander doppelcodiert werden.

zur Unterscheidung der Unterkategorien erklärt - genannt:

erklärt	genannt
Zusammenhang zwischen Größen wird beschrieben (entweder mit Termini oder unterrichtssprachlich)	es wird nur eine Größe oder es werden mehrere Größen genannt
es werden konkrete Zahlenwerte für die Argumentation genutzt	es wird nicht beschrieben, wie sich die Größen zueinander verhalten
wenn am Ende / im Anschluss des Codings der Zusammenhang genauer erklärt wird, dann wird gesamte Stelle mit erklärt codiert (genannt und erklärt können nicht direkt nacheinander codiert werden)	

Messprinzip

Wird codiert, wenn ... prinzipiell beschrieben wird, wie eine Größe mit Hilfe der Messung anderer Größen und anschließender Berechnung über die Formel indirekt gemessen werden kann.

Ankerbeispiel Unser WIDERSTAND gekennzeichnet durch die (Position?) wurde eben angesagt (...) berechnet sich, in dem wir die SPANNUNG messen (...) und diese durch die STROMSTÄRKE teilen. (HBG1,27)

Wird auch codiert, wenn ... die Formel für eine implizierte Rechnung genutzt werden muss ((Hier um?) den Widerstand zu ermitteln, da wir leider kein Vielfachmessgerät zur Verwendung haben, was für uns geeignet ist, müssen wir also ÜBER die Stromstärke- und Spannungsmessung gehen. (ABG1,68))

... die Rechnung ohne Messung erwähnt wird. (Es gibt ein Messgerät, den Widerstandsmesser. Den betrachten wir aber im Unterricht nicht. Da bräuchten wir jedes Mal Batterien. Und das ist einfach eine zu teure Angelegenheit. Das heißt also, wir KÖNNEN das ganze ermitteln, indem wir RECHNEN. (LRR5,118))

... ein Experiment beschrieben und/oder gleichzeitig durchgeführt wird, mit der Zielstellung, den Widerstand eines Bauteils zu bestimmen. (wir (7 s) messen Stromstärke und Spannung für die ZWEITE Glühlampe in unserem Experiment. (ABG1,78))

Wird nicht codiert, wenn... ...eine einzelne Rechnung gemacht wird, ohne das Vorgehen allgemeingültig zu erklären. Dann → Rechnung

Bemerkung

Wenn mit einem Experiment nicht allein ein Wert bestimmt wird, sondern allgemeinere Erkenntnisse über den Zusammenhang erarbeitet werden. Dann Doppelcodierung → Anwendung / Experiment

Beschreibung Einheit

Wird codiert, wenn ... der Zusammenhang zwischen den Einheiten auf beiden Seiten der Formel interpretiert wird.

Ankerbeispiel Das heißt wie viel Volt brauche ich, um ein Ampere aufzubringen. (SSG4,62)

Wird nicht codiert, wenn ...die reine Entsprechung von Einheiten in einer Rechnung auftaucht. Dann → Rechnung

...die Entsprechung von Einheiten gesprochen wird. Dann → IIB Einheit oder III Einheit

Herleitung

Wird codiert, wenn ...eine Formel aus anderen Formeln oder aus Proportionalitäten hergeleitet wird.

Ankerbeispiel

Handwritten derivation showing $R \sim \frac{1}{A}$ and $R \sim l$ leading to $R \sim \frac{l}{A}$. Below this, the formula $R = \rho \cdot \frac{l}{A}$ is boxed and labeled "Widerstandsgesetz".

(SBG4_AB)

Bemerkung Wird im Tafelbild und ggf. im Unterrichtsgespräch notiert. Proportionalitäten werden zusätzlich als solche doppelt codiert.

Zusammenhang der Größen untereinander

Wird codiert, wenn ...die in der Formel vorkommenden Größen miteinander in Beziehung gebracht werden.

Bemerkung Es werden auch Stellen codiert, bei denen der Lehrer explizit dazu auffordert eine bestimmte Aussage zu machen. (L: Je kleiner/
S: Je kleiner der Widerstand, desto größer die Stromstärke.
(AWR4,189-199))
Textstellen in die folgenden Unterkategorien einsortieren!

Zusammenhang der Größen untereinander Proportionalität

Wird codiert, wenn ... direkte oder indirekte Proportionalitäten aus der Formel abgeleitet oder in Vorbereitung der Formel eingeführt werden.

Ankerbeispiel Das I steht unterm Bruchstrich und deswegen sind die umgekehrt zueinander proportional die beiden Größen. (AWR4,202)

Wird nicht codiert, wenn ...die Proportionalität nicht aus einer Formel abgeleitet oder in Vorbereitung auf die Formel besprochen wird, sondern ein eigenes Gesetz ist (z. B. I-U als Ohmsches Gesetz und nicht in Bezug auf $R=U/I$)

Bemerkung Aussagen in Unterkategorien einteilen

Zusammenhang der Größen untereinander Proportionalität Proportionalität I

Wird codiert, wenn ...die direkte oder indirekte Proportionalität zweier in der Formel vorkommenden Größen als algebraischer Ausdruck notiert wird.

Ankerbeispiel

Handwritten expression $R \sim l$.

(HBG3_TB)

Zusammenhang der Größen untereinander Proportionalität Proportionalität IIB

Wird codiert, wenn ...eine direkte oder indirekte Proportionalität zwischen zwei in der Formel vorkommenden Formelzeichen ausgedrückt wird.

Ankerbeispiel R proportional eins durch Querschnitt (ABG5,90)

Zusammenhang der Größen untereinander Proportionalität Proportionalität III

Wird codiert, wenn ...eine direkte oder indirekte Proportionalität zwischen in der Formel vorkommenden Größen ausgedrückt wird.

Ankerbeispiel Der Widerstand ist proportional zur Länge. (HBG3,93)

Wird nicht codiert, wenn ...mindestens eine Größe nicht als Terminus, sondern als Formelzeichen gesprochen wird. Dann → Proportionalität IIB

Zusammenhang der Größen untereinanderVeränderung in gleiche/unterschiedliche Richtung - *Fachsprache*

Wird codiert, wenn ...beschrieben wird, dass sich zwei in der Formel vorkommende Größen in gleiche (bei direkter Proportionalität) bzw. unterschiedliche (bei indirekter Proportionalität) Richtung verändern.

Ankerbeispiel *MEHR Spannung für ähnlichen Strom heißt (...) höherer Widerstand. (SSG4,214)*

Wird auch codiert, wenn ...beschrieben wird, dass sich bei Proportionalität zwei Größen grundsätzlich so verhalten. (L: *Also, wie WAR das mit der Proportionalität? Da wurde die eine Größe? S: größer. L: Und die andere auch. (LRR4,57-59)*)
... einzelne Größen in Unterrichtssprache gesprochen werden (z. B. von Spannung, Stromstärke und Behinderung gesprochen wird (BTR2, 303)).

Zusammenhang der Größen untereinanderVeränderung in gleiche/unterschiedliche Richtung - *Unterrichtssprache*

Wird codiert, wenn ...der Einfluss einer Größe auf eine andere Größen qualitativ beschrieben wird.

Ankerbeispiel *In dem Moment, wenn ich einen HOHEN Widerstandswert habe, wird der Stromfluss mehr behindert, als wenn ich einen kleinen Widerstandswert habe. (ABG1,121)*

Wird auch codiert, wenn ...beim Widerstandsgesetz allgemein von der Stromstärkebegrenzung durch einen Widerstand oder dem Spannungsabfall am Widerstand gesprochen wird.
...davon gesprochen wird, dass sich bei Proportionalität zwei Größen grundsätzlich so verhalten.

Wird nicht codiert, wenn halbquantitative Zusammenhänge zwischen den Größen hergestellt werden. Dann → Veränderung in gleiche / unter
...erwähnt wird, dass eine Größe von einer anderen abhängt, ohne dass dies weiter ausgeführt wird. Dann → abhängig von...

Bemerkung Abgrenzung zu Veränderung - Fachsprache:
- Alltagssprachliche Beschreibung, qualitative Aussagen (z. T. statt physikalische Größen, allgemeinere Ausdrücke, z.B. Stromfluss statt Stromstärke
Wenn der Zusammenhang in einen Kontext eingebettet ist, also beschrieben wird, wofür man diesen Zusammenhang braucht / wo er zur Anwendung kommt / wo er eine Rolle spielt. Dann Doppelcodierung → Experiment / Anwendung - erklärt / genannt

Zusammenhang der Größen untereinander

Veränderung in gleichem/unterschiedlichem Maß

Wird codiert, wennbeschrieben wird, dass sich zwei in der Formel vorkommende Größen in gleichem (bei direkter Proportionalität) bzw. umgekehrtem (bei indirekter Proportionalität) Maß verändern.

Ankerbeispiel *dass die Spannung und die Stromstärke sich immer gleich verändern (KTH1,115)*

Wird auch codiert, wenn ...beschrieben wird, dass sich bei Proportionalität zwei Größen grundsätzlich so verhalten. (*Proportional HEISZT: Was mit der einen Größe passiert, passiert auch mit der anderen Größe, wenn wir es ganz kurz formulieren wollen. (BTR4,80)*)

Bemerkung Wenn der Zusammenhang in einen Kontext eingebettet ist, also beschrieben wird, wofür man diesen Zusammenhang braucht / wo er zur Anwendung kommt / wo er eine Rolle spielt. Dann Doppelcodierung → Experiment / Anwendung - erklärt / genannt

Signalwörter gleich verändern, Veränderung ist gleich

Zusammenhang der Größen untereinander Verdoppelung...

Wird codiert, wenn ...beschrieben wird, dass bei direkter bzw. indirekter Proportionalität sich eine Größe verdoppelt, verdreifacht usw. bzw. halbiert, drittelt usw., wenn sich die andere verdoppelt, verdreifacht usw.

Ankerbeispiel *bei einer Verdoppelung der Länge, führt das zu einer Verdoppelung des Widerstandes beziehungsweise bei einer VERDREIFACHUNG der Länge führt es zu einer VERDREIFACHUNG des Widerstandes. (ABG5,68)*

wird nicht codiert, wenn ...die Proportionalitäten genutzt werden, um konkrete Werte zu ermittelt. Dann → Rechnung - Prop. Werte ermittelt

Zusammenhang der Größen untereinander je-desto-Satz

Wird codiert, wenn ...ein je-desto-Satz mit den in der Formel vorkommenden Größen formuliert wird.

Ankerbeispiel *Je GRÖßER der Querschnitt, desto KLEINER ist der Widerstand (SBG4,98)*

Zusammenhang der Größen untereinander Quotienten- / Produktgleichheit	
Wird codiert, wenn	...Quotienten- bzw. Produktgleichheit als Bedingung für direkte bzw. indirekte Proportionalität zweier in der Formel vorkommender Größen angeführt wird.
Ankerbeispiel	<i>Der Quotient R geteilt durch L ist konstant. Und für alle Messwerte die wir bilden, kriegen wir EINEN identischen Wert raus für den Quotienten.</i> (ABG5,90)
Zusammenhang der Größen untereinander abhängig von...	
Wird codiert, wenn	...davon gesprochen wird, dass eine in der Formel vorkommende Größe von einer anderen abhängt, ohne dass die Art der Abhängigkeit näher beschrieben wird.
Ankerbeispiel	<i>Der Widerstand ist materialabhängig.</i> (HBG3,125)
Wird auch codiert, wenn	...davon gesprochen wird, dass sich eine Größe verändert, wenn sich eine andere verändert. (<i>Dieser verändert dadurch seine Länge und damit seinen elektrischen Widerstand.</i> (AWR5,139)) ...allgemein davon gesprochen wird, dass ein Zusammenhang zwischen zwei Größen besteht. (<i>Das Widerstandsthermometer das profitiert von den Zusammenhängen zwischen Widerstand, Spannung und STROMSTÄRKE.</i> (AWR4,178))
Wird nicht codiert, wenn	...die Art der Abhängigkeit näher beschrieben wird oder die Abhängigkeiten mit Zahlen gestützt werden. Dann → Experiment / Anwendung (genannt)
Signalwörter	abhängig von, Abhängigkeit, hängt ab von, Zusammenhang zwischen
Zusammenhang der Größen untereinander Spezial-/ Grenzfälle	
Wird codiert, wenn	...Spezial-, Grenz- oder Extremfälle für die Größen der Formel theoretisch ausgelotet werden.
Ankerbeispiel	<i>Und wenn eben der Widerstand HOCH ist, beispielsweise vierzig Ohm, brauche ich eben vierzig Volt und wenn der Widerstand KLEIN ist, beispielsweise 29 Ohm, dann brauche ich da 29 Volt.</i> (SSG5,61)
Wird auch codiert, wenn	...der Grenzwert nur implizit auf die Formel zurückzuführen ist, aber nicht explizit durch die Formel untersucht wird. (<i>Na, was passiert denn bei Null Spannung? Null/ Da passiert gar nichts. Genau so.</i> LRR4,59)

einzelne Größen werden beschrieben	
Wird codiert, wenn	...die in der Formel vorkommenden Termini mit Alltagssprache beschrieben werden.
Ankerbeispiel	<i>Wie stark die Behinderung des elektrischen Stromes ist.</i> (AWR4,111)
Bemerkung	Unterkategorien für einzelne Termini bilden. für $R=U/I$ ergibt sich für R die spezielle Kategorie Behinderung:
einzelne Größen werden beschrieben Größe, Formelzeichen, Einheit	
Wird codiert, wenn	...die Verknüpfung von in der Formel vorkommenden Größen mit ihren zugehörigen Formelzeichen und/oder Einheiten explizit angesprochen oder vom Lehrer verlangt wird, dass Schüler dies zuordnen.
Ankerbeispiel	<i>Die Spannung, Formelzeichen ist U und die geben wir in Volt an</i> (HBG2,11)
Wird auch codiert, wenn	...Größe und Formelzeichen kombiniert gesprochen werden: Widerstand R ... Größen mit ihren Einheiten kombiniert gesprochen werden (<i>Spannung in Volt</i> (HBG2,123), <i>Spannung in V</i> (HBG3,5)) ... der Lehrer von den Schülern verlangt, dass sie ein Formelzeichen einer Größe zuordnen oder umgekehrt. (<i>Formelzeichen für den elektrischen Widerstand?</i> (SBG2,9))
Wird nicht codiert, wenn	... die Größe nicht genannt wird, sondern nur ihr Formelzeichen und die zugehörige Einheit (I in Ampere / I in A)
Bemerkung	U und I werden nur dann zum Ohmschen Gesetz und R nur dann zum Widerstandsgesetz zugeordnet, wenn die Aussagen explizit mit dem Ohmschen Gesetz bzw. Widerstandsgesetz verknüpft sind. Sonst werden U , I und R immer $R=U/I$ zugeordnet.
Signalwörter	Formelzeichen, Größe, Einheit
einzelne Größen werden beschrieben RUI Behinderung	
Wird codiert, wenn	...der Widerstand als Behinderung der Elektronen benannt wird.
Ankerbeispiel	<i>DURCH diese Behinderung, durch die GEZIELTE Behinderung der Ladungsträger</i> (ABG1,29)
Wird auch codiert, wenn	...sprachlich eng verwandte Begriffe für den Widerstand genutzt werden, wie bspw. Hindernis, Anstrengung, bremsen, entgegen stellen.
Wird nicht codiert, wenn	...von Stau gesprochen wird. Dann → Analogie – Straße.
Signalwörter	Behinderung, behindern

Modell	
Wird codiert, wenn	...die Formel mit Hilfe eines physikalischen Modells erklärt wird (z.B. Teilchenmodell).
Ankerbeispiel	<i>(Ich denke jetzt an die Gitterbausteine.) Die bewegen sich noch mehr. Ne? Wenn es denen warm wird, wird denen richtig warm und dann Was passiert denn jetzt automatisch? Kommen die Elektronen so richtig schön durch? mehrere S: Nein. L: Und DAS ist die BEHINDERUNG des Stromes. Der kann/ Die Elektronen können nicht mehr so schön durch, wie sie mal wollten. (LRR5,155-157)</i>
Wird auch codiert, wenn	...das Modell mit Schülern nachgespielt wird.
Wird nicht codiert, wenn	...nur einzelne Wörter auf ein Modell verweisen, ohne dass das Modell näher beschrieben wird. ()
Bemerkung	ggf. Unterkategorien für unterschiedliche Modelle bilden Teilaussagen können häufig mit Zusammenhang zwischen den Größen doppelcodiert werden.

Analogie	
Wird codiert, wenn	...die Formel oder der Zusammenhang als physikalische Größe mit Hilfe von Analogien interpretiert wird.
Ankerbeispiel	<i>Ich versuch's mal mit der / auf der menschlichen Basis das Prinzip von Umgehungsstraßen. Ist genau das Prinzip. Du hast eine STRASSE, du hast hier ein DORF, die Straße geht hier weiter. Die Leute im Dorf nervt das, dass die ganzen Autos hier durchfahren. Was MACHEN sie also? Beantragen (unv.) et cetera PP. Bauen eine schöne Umgehungsstraße hier drum. Naja, der Weg ist schon kürzer (...) ABER der Weg geht eben deutlich schneller. Weil er wahrscheinlich breiter ist, weil nicht so viele Ampeln sind, das kann man alles irgendwie auf Elektronen übertragen. (SSG2,102)</i>
Bemerkung	Innerhalb dieser Kategorie werden Einzelaussagen häufig auch in andere Kategorien doppelcodiert. ggf. Unterkategorien bilden, bei R=U/I wurden die folgenden Unterkategorien gefunden:
Analogie – RUI Straße	
Wird codiert, wenn	...Auto-, Fahrrad- oder Fußgängerkehr als Analogie für elektrischen Strom genutzt wird, um den Widerstand zu verdeutlichen.
Ankerbeispiel	<i>Das ist wie wenn ich zur Hauptverkehrszeit, zum Beispiel wenn Weihnachtsmarkt ist, vom Hauptbahnhof zum Karstadt will. Da stoße ich DAUERND gegen irgendwelche Leute, die an den Buden rumstehen. (BTR2,261)</i>
Wird auch codiert, wenn	...davon gesprochen wird, dass Elektronen sich stauen. (die Elektronen, hier haben sie eine unheimliche Engstelle, das heißt, der Stau wird wahrscheinlich schon bis hier oben sein. (SSG4,44))
Analogie – RUI Reibung	
Wird codiert, wenn	...Widerstand mit Reibung verglichen wird oder die Entstehung des Widerstandes mit Reibung der Elektronen an den Gitterbausteinen des Leiters erklärt wird.
Ankerbeispiel	<i>Wäre eine mögliche Vermutung. Dass man sagt vielleicht, dass die Reibungseffekte so groß sind, ohne dass es ausreichen würde, die Lampe dann durch diese STARKE, extrem starke Behinderung zum Leuchten zu bringen. (ABG1,86)</i>
Analogie – RUI Tür	
Wird codiert, wenn	...eine offene oder geschlossene Tür als Analogie für den Widerstand dient.

Ankerbeispiel	<i>S: Aber nehmen wir mal an, ich werde jetzt vom Essen angezogen (unv.) wenn ich zwei Türen (unv.)</i> <i>L: Doch. Doch, doch. Angenommen / mach mal, angenommen / ang / wenn wir es wirklich mal / natürlich wir vermenschlichen das gerade so ein bisschen, die Elektronen riechen das nicht. Aber gehen wir mal auf diese menschliche Basis. Du riechst doch im Endeffekt ob ein Essen im Endeffekt, ob / ob die Tür offen ist oder ob die Tür zu ist. Das reichst du doch. Das heißt, ob du die Tür vorher aufmachen musst oder ob du durch eine offene Tür gehen kannst. Das riechst du doch. (SSG4,41-42)</i>
---------------	--

Analogie – RUI Comic

Wird codiert, wenn ...die Größen U, I, R durch Comicmännchen verbildlicht werden.

Ankerbeispiel	Bild von drei Männchen, die mit Ohm, Volt und Ampere beschriftet sind. Volt schiebt Ampere durch ein Rohr, das Ohm mit einem Seil enger zieht (Abb. aus urheberrechtlichen Gründen entfernt)
---------------	---

Bemerkung Die Abbildung selbst und ihre Beschreibung werden codiert.

Analogie – RUI Wasserkreislauf

Wird codiert, wenn ...der elektrischer Widerstand verdeutlicht wird, indem elektrischer Strom mit einem Wasserkreislauf verglichen wird.

Ankerbeispiel	<i>S1: Also, der Trichter, da ist Wasser drinne und das ist unsere Ladung</i> <i>L: Jawoll</i> <i>S1: Der Wasserhahn ist unser Widerstand. Und wenn der zu ist, ist halt der Widerstand re / also groß und ist kommt nichts, es kommt keine Ladung dadurch.</i> <i>L: Jawoll (SSG4,64-75)</i>
---------------	---

Wird auch codiert, wenn ...Leiter als Rohre und Widerstand als Engstellen dargestellt werden. (Also, erst mal der Widerstand sorgt dafür, dass die Elektronen bei ihrem Gang durch den Leiter behindert werden. Und das wird eben hier dadurch dargestellt, dass das Rohr verengt wird. (SSG4,100))

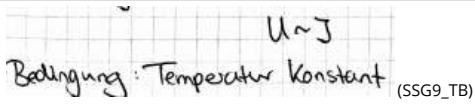
Bemerkung Die codierte Stelle darf Schüleraussagen beinhalten, wenn die Lehrkraft die Schüler dazu aufgefordert hat, die Analogie zu nutzen.

ÜBER FORMEL WIRD GESPROCHEN

Metareflexion Sprache	
Wird codiert, wenn	...über in der Formel enthaltene physikalische Termini auf einer Metaebene sprachlich reflektiert wird (z.B. Wortherkunft, Rechtschreibung, Homonyme)
Ankerbeispiel	<i>Ähm im Lateinischen sagt man auch resistente. Und daher unser Buchstabe für (unverständlich) Formelzeichen großes R. (LRR5,118)</i>
Wird auch codiert, wenn	...die Herkunft eines Formelzeichens über Fremdsprachen erklärt wird. (Resistance. (...)) So, oder aber, wem das zu schwer ist, das mit dem Englischen, der merkt sich einfach resistant, da ist man widerstandsfähig gegen irgendetwas. (SBG2,11)) ...die Rechtschreibung eines Terminus betont wird. (Ja, wieder ist im Endeffekt, wenn was sich WIEDERHOLT, im Sinne von ich komme wieder. Dann schreibt man es mit IE, aber das ist jetzt gemeint wider im Sinne von gegen. Also ich tue dies WIDER seiner Meinung. Also GEGEN seine Meinung. Und dieses WIDER schreibt man eben bloß mit I. (SSG3,45)) ...unterschiedliche Bedeutungen eines Begriffes für einen Termini thematisiert werden. (dass der Widerstand eine Eigenschaft von einem Bauelement sein kann. (Entweder?), dass der Widerstand aber auch eine physikalische Größe ist, die ich berechnen kann (AWR5,26))
Analogie andere Formel	
Wird codiert, wenn	...die Struktur der Formel mit einer anderen bekannten Formel verglichen wird.
Ankerbeispiel	<i>Weil ihr wisst ja, P ist gleich F durch A hat ungefähr die gleiche Struktur. (HBG2,21)</i>
wird auch codiert, wenn	...die Analogie über die Einheiten hergestellt wird. (EIN Meter pro Sekunde, machen wir mal nicht einen Meter, machen wir mal 33 Meter pro Sekunde, hieß 33 Meter pro EINE Sekunde. (...) Und jetzt haben wir beispielsweise, ja behalten wir unsere Zahl, 33 OHM, was ja das gleiche ist, wie 33 VOLT durch AMPERE (...) heißt also jetzt wieder übersetzt, ich brauche 33 VOLT, (...) PRO (...) EINEM Ampere. Also um den Strom von einem Ampere fließen zu lassen (SSG3,78))

Merkhilfe	
Wird codiert, wenn	...eine Merkhilfe für die Formel oder umgestellte Formen präsentiert wird.
Ankerbeispiel	 (ABG_TB_1)
Wichtigkeit / Vorteile der Formel	
Wird codiert, wenn	... die Wichtigkeit einer Formel betont wird oder Vorteile einer Formel beschrieben werden.
Ankerbeispiel	<i>Das ist eine der WICHTIGSTEN Gleichungen, die wir in der Elektrizitätslehre haben. Diese Gleichung sollte auch OHNE Tafelwerk jeder spätestens nach zwei bis drei Wochen drauf haben. (HBG1,27)</i>
wird auch codiert, wenn	...der konkrete Nutzen einer Formel beschrieben wird (<i>Also man kann dem einen Wert zuordnen und so den Widerstand von unterschiedlichen Bauelementen, wie wir das jetzt hatten, vergleichen. (KPR4,115)</i>) ... die Wichtigkeit oder Vorteile nur implizit betont werden, z. B. durch die Art der Notation oder durch den Hinweis, dass diese gemerkt werden muss. (<i>Einrahmen. Ausrufezeichen dran. (BTR2,314), Na gut, jetzt wisst ihr aus der Erfahrung, der (6s) Physiker ist immer bestrebt alles ziemlich genau zu beschreiben (KPR7,86)</i>) ...ganz allgemein davon gesprochen wird, dass eine Formel (für etwas) gebraucht wird. (<i>Wir brauchen irgendwie eine Formel. (BTR6,258)</i>) ...die Wichtigkeit einer Formel innerhalb des Unterrichtes betont wird. (<i>Und das ist auch morgen wichtig in der Arbeit, immer erst mal die Grundformeln aufschreiben. Dadrauf gibt es schon BEs oder Punkte. Bewertungseinheiten. ABG6,7</i>)

Vergleich Experiment-Theorie	
Wird codiert, wenn	... ein mit experimentellen Werten berechneter Wert mit einem theoretisch gegebenen Wert verglichen wird.
Ankerbeispiel	<i>EINHUNDERT Ohm. Stimmt bei allen DREI Werten. Und bei dem Vierten auch. So. Jetzt gucken wir nach, (9 s) richtig gerechnet, schön X! (SBG2,62,27)</i>
wird auch codiert, wenn	...rechnerische Ergebnisse auf ihre Genauigkeit hin beurteilt werden. (<i>KÖNNTE man jetzt sagen: Es schwankt wieder um EINEN Wert. Also wenn wir richtig PERFEKT, ideal arbeiten könnten, was hätten wir dann raus gekriegt? (LRR5,70)</i>)
Anwendungsbereich / Einbettung in Theorie	
Wird codiert, wenn	... die Formel explizit in eine physikalische Theorie eingebettet wird (z.B. Benennung E-Lehre) oder ein Anwendungsbereich der Formel beschrieben wird.
Ankerbeispiel	<i>Das ist eine der WICHTIGSTEN Gleichungen, die wir in der Elektrizitätslehre haben. (HBG1,27)</i>
Wird auch codiert, wenn	...ein Anwendungsbereich einer Formel benannt wird oder zu dem einer anderen Formel abgegrenzt wird. (<i>L: Warum brauchen wir zwei verschiedene Formeln ? Was ist anders an der Formel als an R ist gleich U durch I? Warum brauchen wir zwei Formeln? (...) Genau, es kommt darauf an, welche Größen wir gegeben haben. Wenn wir eine Stromstärke- und Spannungsmessung machen und wissen wollen wie groß ist unser Widerstand, dann benutzen wir das Ohmsche Gesetz, R ist gleich U durch I. Wenn ich weiß, ich baue irgendwas aus MESSING und zwar über eine gewisse Länge und mit einem gewissen Querschnitt, dann kann ich meinen Widerstand über (...) das Widerstandsgesetz berechnen. (HBG3,133)</i>)
Wird nicht codiert, wenn	...beschrieben wird, dass eine Formel nur unter bestimmten Bedingungen gültig ist. Dann → Gültigkeitsbedingung.

Gültigkeitsbedingungen	
Wird codiert, wenn	...Gültigkeitsbedingungen für die Formel genannt oder an der Tafel notiert werden.
Ankerbeispiel	
Wird auch codiert, wenn	...beschrieben wird, dass eine Formel für eine Aufgabe oder einen Anwendungsbereich nicht gültig ist, da bestimmte Bedingungen nicht erfüllt sind. (Gut, jetzt müssen wir der Ehrlichkeit halber sagen, ganz so ist es nicht. Weil wir rechnen hier mit Gleichspannung, dort wird mit Wechselspannung gearbeitet. Da ist es nicht ganz so EXTREM die Verluste. (ABG6,54)) ...die Gültigkeitsbedingung nur implizit formuliert wird. (Für einen metallischen Leiter gilt: Stromstärke und Spannung sind zueinander proportional. (BTR2,60) oder Dass sich die Stromstärke/äh tschuldigung, die Spannung und die Stromstärke in gleichem Verhältnis ändert. Das gibt es bei Konstantendraht zum Beispiel. Das gibt es bei fast allen anderen metallischen Leitern. (KPR3,28))
Signalwörter	gültig, Gültigkeitsbereich, Bedingung, Voraussetzung
Klassifizierung der Formel	
Wird codiert, wenn	...Aussagen über die Formel gemacht werden, die die Formel in ihrem Aussagecharakter klassifizieren.
Klassifizierung der Formel Formel zur Berechnung	
Wird codiert, wenn	... die Formel i.S. ihres Aussagecharakters als Berechnungsformel interpretiert wird.
Ankerbeispiel	Im Lehrbuch stand auch noch eine FORMEL zum BERECHNEN des elektrischen Widerstandes. (ABG1,37)
Wird auch codiert, wenn...	... explizit gesagt wird, dass die Formel für eine Berechnung gebraucht wird. (Mit welcher Gleichung oder welcher Formel berechne ich den Widerstand? (SBG3,34))
Wird nicht codiert, wenn	... ein konkretes Beispiel gerechnet wird. (Ihr nehmt auch zwei Werte, (...) acht Volt beispielsweise geteilt durch achtzig Milliampère (...) und berechnet mir den zugehörigen Wert. (SBG3,38)) Dann → Rechnung
Signalwörter	man berechnet ..., indem... ; Formel zur Berechnung

Klassifizierung der Formel Formel als Definition	
Wird codiert, wenn	... die Formel i.S. ihres Aussagecharakters als Definition interpretiert wird.
Ankerbeispiel	Also man definiert diesen Quotienten, U durch I, Spannung durch Stromstärke, als elektrischen Widerstand. (LRR5,87)
Wird auch codiert, wenn	...davon gesprochen wird, dass eine Größe eine bestimmte Formel „hat“. (So der Widerstand hat die Formel: R ist gleich U durch I. (AWR4,182)) ...ein Formelausdruck nachträglich als eine bestimmte physikalische Größe benannt wird. (Das Verhältnis aus Spannung und Stromstärke wird el. Widerstand genannt. KPR3_TB) ...eine Formel explizit als Definitionsformel / Formel zur Definition bezeichnet wird. (Dort hätten wir noch mal die Anwendung für die Widerstandsberechnung mit Hilfe vom Widerstandsgesetz beziehungsweise der Definitionsgleichung. (ABG6,75))
Signalwörter	Definitionsgleichung, Definitionsformel
Klassifizierung der Formel Formel als empirisches Gesetz	
Wird codiert, wenn	... die Formel i.S. ihres Aussagecharakters als ein empirisches Gesetz beschrieben wird.
Ankerbeispiel	Welches Gesetz haben wir kennengelernt? Wie nannten wir das?. (KPR4,5)
Wird auch codiert, wenn	...beschrieben wird, dass die Formel aus Messwerten abgeleitet wurde. (WIE ist diese Formel jetzt zu lesen? Beziehungsweise wie ist sie jetzt aus unseren Messwerten entstanden. (ABG5,90)) ...davon gesprochen wird, dass die Formel entdeckt oder gefunden wurde. (So diesen Zusammenhang hat ein, ja ein Lehrer entdeckt. (KTH1,115))
Wird nicht codiert, wenn	...der Name einer Formel genannt wird, der den Begriff Gesetz enthält, ohne dass dies näher erklärt wird oder besonders hervorgehoben wird. (ob du dich mal konzentrierst, was das Widerstandsgesetz ist? LRR11,13))
Signalwörter	Gesetz, aus Messreihen/-daten

Klassifizierung der Formel Formel als Verallgemeinerung	
Wird codiert, wenn	...eine Formel als Verallgemeinerung konkreter Fälle bezeichnet wird.
Ankerbeispiel	<i>L: Und jetzt allgemein, wenn jetzt der Draht nur fünfzig Meter lang gewesen wäre? Was hätten wir dann machen müssen, X?</i> (BTR6,308)
Signalwörter	allgemein, Verallgemeinerung
Klassifizierung der Formel Formel als Kurzform	
Wird codiert, wenn	...eine Formel als Kurzform eines Satzes bezeichnet wird.
Ankerbeispiel	<i>Also die Berechnung ist ausgeschrieben elektrischer Widerstand gleich Spannung am Bauelement durch die Stromstärke. Und in Kurzform, weil wir das ja nicht immer so schreiben wollen, R ist gleich U durch I.</i> (LRR5,119)
wird auch codiert, wenn	... über Vorteile oder Nachteile von Formelzeichen gegenüber Wörtern gesprochen wird (<i>Da das Blatt so klein ist, könnt ihr die Formelzeichen hinschreiben U, I</i> (AWR4,166)) Formelzeichen als Kurzform der Termini benannt werden (<i>S7: Spannung L: Genau. Kürzen wir ab mit?</i> (BTR3,85-86)) Der Lehrer betont, dass SchülerInnen wissen müssen, wofür die Formelzeichen stehen. (<i>Wir müssen wissen was U ist, wir müssen wissen was groß I bedeutet.</i> (EPR4,67))
Signalwörter	Kurzform, Abkürzung
Klassifizierung der Formel Formel als formal gegeben	
Wird codiert, wenn	... eine Formel als formal gegeben oder als Grundformel klassifiziert wird, ohne dass weiter über ihre (erkenntnistheoretische) Herkunft reflektiert wird.
Ankerbeispiel	<i>Jetzt lassen wir diese Formel einfach erst mal so im Raum stehen und sagen, die ist einfach gegeben.</i> (ABG1,37)
Wird nicht codiert, wenn	...nicht explizit gesagt wird, dass es nicht von Interesse ist, woher die Formel kommt, z. B. wenn die Formel aus der Formelsammlung gesucht wird. (<i>Wir haben zwei Formeln</i> (ABG6,41))
Signalwörter	formal, gegeben, Grundformel

C. Gütekriterien

C.1. Intercoderübereinstimmungen

In den folgenden Tabellen wird die Intercoderübereinstimmung angegeben, die mit Hilfe der Software MAXQDA18 berechnet wurde. Hierfür wurde eine Auswahl des Datenmaterials von einer zweiten Person mit Hilfe des Codierleitfadens (vgl. Anhang B.1) codiert und die codierten Segmente im Anschluss durch MAXQDA18 miteinander verglichen.

Die Software vergleicht bei der Bestimmung der Intercoderübereinstimmung jeweils jedes einzelne Coding zwei identischer Dokumente (vom Erst- und Zweitcodierer). Ist ein Coding im ersten Dokument auch im zweiten Dokument zu finden, dann gibt es eine Übereinstimmung. Dabei kann eine Toleranzgrenze für die Überlappung der Codings eingestellt werden, ab der eine Übereinstimmung festgestellt wird. Für die Stundentranskripte wurde dabei eine Codeüberlappung von 70% vorausgesetzt, für die Bilddokumente (Tafelbilder und Arbeitsblätter) eine Codeüberlappung von 50%. Diese relativ niedrigen Werte sind durch extreme Unterschiede in den Codinglängen zu begründen. Einige codierte Textsegmente umfassen nur ein einzelnes Wort, andere gehen über mehrere Absätze. Da für die Fragestellung dieser Arbeit vor allem relevant ist, dass die identischen Stellen identifiziert werden, nicht aber, welche konkreten Sätze, wird eine Codeüberlappung von 70% als ausreichend angesehen. In Bilddokumenten ist der Unterschied zwischen zwei Codings schnell sehr groß, wenn beispielsweise eine Formel mit einer größeren oder kleineren Umgebung ausgewählt wird. Aus diesem Grund wurde die Codeüberlappung für die Bilddokumente noch weiter nach unten gesetzt. Für die Berechnung werden die Codelängen zum Teil manuell angepasst, sodass eine Übereinstimmung auch dann tatsächlich erkannt wird, wenn die gleiche Stelle mit unterschiedlichen Codinglängen codiert wird.

Die prozentuale Übereinstimmung ergibt sich bei diesem Verfahren durch die relative Anzahl übereinstimmender Codings, also die Anzahl übereinstimmender Codings geteilt durch die Gesamtzahl der Codings und wird in den tabellarischen Übersichten auf ganzzahlige Prozentzahlen ab- beziehungsweise aufgerundet.

$$\text{Übereinstimmung} = \frac{\text{übereinstimmende Codings}}{\text{übereinstimmende Codings} + \text{nicht – übereinstimmende Codings}}$$

In Vorbereitung auf das Interoding wurde eine Schulung durchgeführt, bei der sich die Zweitcodiererin zunächst mit den theoretischen Grundlagen des Kategoriensystems auseinandergesetzt hat und anschließend den Codierleitfaden durchlas und Fragen dazu stellte. Im Anschluss codierte sie ein Studententranskript und alle Abweichungen wurden diskutiert und erste Anpassungen im Codierleitfaden vorgenommen. Dieses Vorgehen wurde mit einer zweiten Stunde wiederholt. Im Anschluss an diese zwei Trainingsrunden begann die eigentliche Zweitcodierung. Alle Abweichungen der Codierungen wurden diskutiert. In dieser Diskussion konnten alle Diskrepanzen dahingehend geklärt werden, dass eine für beide Codiererinnen zufriedenstellende Kategorie für alle Stellen gefunden wurde und Codierungen entsprechend angepasst wurden. Nach der Diskussion konnte somit eine Übereinstimmung von 100% erreicht werden. Die Beschreibungen der Kategorien im Codierleitfaden wurden im Zuge dieser Diskussion stellenweise verbessert und angepasst. Damit wurde der Codierleitfaden zusätzlich ein weiteres Mal diskursiv evaluiert.

Es wurden 425 Minuten von insgesamt 4740 Minuten des transkribierten Unterrichts vom Interoder zweitcodiert. Das entspricht 9,0% der Datenmenge. Bei der Auswahl der Transkripte wurde darauf geachtet, dass Stunden von fast allen Lehrkräften (9 von 10) vom Interoder bearbeitet wurden. Außerdem wurden Stunden vom Beginn, der Mitte und dem Ende der Unterrichtssequenz ausgewählt, sodass auch unterschiedliche Formeln und Unterrichtsabschnitte (Einführung einer Formel, Übung etc.) auftraten.

Die Anzahl der Codings betrifft die insgesamt aufgetretene Anzahl an Codings in der jeweils angegebenen Dokument-beziehungsweise Codegruppe. Da das Programm MAXQDA18 jeweils zwei Dokumente von zwei unterschiedlichen Codierern miteinander vergleicht, ergibt sich diese Anzahl als Summe aus der Anzahl der Codierungen im ersten Dokument und der Anzahl der Codierungen im zweiten Dokument. Die Anzahl der Codes gibt an, wie viele Codes des gesamten Kategoriensystems tatsächlich auftraten. Es ist erkennbar, dass diese stark schwankt. Insgesamt tauchten alle Codes in den Textstellen auf, die für den Interodingprozess ausgewählt wurden. Es traten jedoch nicht alle Kategorien auch für alle Formeln auf, da einige Kategorien im gesamten Datenmaterial nur für einzelne Formeln auftraten.

	Übereinstimmung	Codings	Codes
insgesamt	66%	824	100
Studentranskripte	60%	593	90
Tafelbilder	81%	128	23
Arbeitsblätter	78%	103	23
$R = \frac{U}{I}$	69%	496	45
Ohmsches Gesetz	46%	92	23
Widerstandsgesetz	67%	236	32
<i>Formel wird gesprochen</i>	82%	195	16
<i>Formel wird angewendet</i>	64%	518	62
<i>Über Formel wird gesprochen</i>	47%	111	22

Tabelle C.1.: InterCoderübereinstimmungen insgesamt, nach Dokumenttypen, Formeln und Oberkategorien

	Übereinstimmung	Codings	Codes
HBG5 (Studentranskript)	32%	19	11
SSG3 (Studentranskript)	83%	63	19
ABG6_TB (Tafelbild)	100%	22	5
EPR10_TB (Tafelbild)	56%	18	11
SBG5_AB (Arbeitsblatt)	91%	11	3
HBG5_AB (Arbeitsblatt)	60%	10	4

Tabelle C.2.: Minimale und maximale InterCoderübereinstimmung für jeden Dokumententyp

Bei genauerer Analyse der Übereinstimmungen zeigen sich einige Auffälligkeiten, die im Folgenden beschrieben werden. Die InterCoderübereinstimmungen bei den Tafelbildern ist deutlich höher als bei den anderen Dokumenten (vgl. Tabelle C.1). Dies ist darauf zurückzuführen, dass hier besonders häufig Kategorien der Überkategorie „Formel wird gesprochen / geschrieben“ auftauchen, die insgesamt eine wesentlich höhere Übereinstimmung aufweist (vgl. Tabelle C.1). Hierzu ist anzumerken, dass es sich bei der Kategorie „Formel wird gesprochen“ um eine rein deskriptive Kategorie¹

¹als deskriptive Kategorien werden hier Kategorien bezeichnet, die die äußere Form einer Aussage (welche Art von Zeichen werden genutzt, z. B. Formelzeichen oder Fachbegriffe) beschreibt, und

handelt, während die Kategorien „Formel wird angewendet / interpretiert“ zum Teil analytische Kategorien² enthält (z. B. wenn entschieden werden muss, ob eine Aufgabe einen Anwendungsbezug hat oder nicht) und die Kategorie „Über Formel wird gesprochen“ vorrangig analytische Unterkategorien enthält, wenn auf einer Metaebene über eine Formel und die Art ihrer Aussagen gesprochen wird. Da analytische Kategorien wesentlich schwerer zu identifizieren sind als deskriptive, ist die Differenz der Übereinstimmungen somit weder überraschend noch als besonders negativ zu werten.

Auch bei einem Vergleich der Übereinstimmungen bei Kategorien unterschiedlicher Formeln zeigt sich als Auffälligkeit, dass die Übereinstimmung für das Ohmsche Gesetz ($I \sim U$) mit 45,85% deutlich unter der Übereinstimmung der anderen Formeln liegt. Bei einer genaueren Betrachtung der Codierungen zeigt sich, dass insbesondere die Abgrenzung zu $R = \frac{U}{I}$ stellenweise uneindeutig ist und Fehleinordnungen der Unterkategorien Proportionalität voreingenommen wurden, da in diesem besonderen Fall der algebraische Ausdruck selbst eine Proportionalität ist. Der Codierleitfaden scheint also nur eingeschränkt auf algebraische Ausdrücke, die keine Gleichungen sind, übertragbar zu sein. Sollte der Codierleitfaden für weitere algebraische Ausdrücke in Form von Proportionalitäten angewendet werden, müsste er grundsätzlich überarbeitet und angepasst werden.

Tabelle C.2 zeigt die Schwankungen der Inter-coderübereinstimmungen auf Dokumentebene. Es scheint, dass diese Schwankungen nicht von der Position der Stunde innerhalb der Unterrichtssequenz und auch nicht von einzelnen LehrerInnen abhängen. Dies spricht dafür, dass das Kategoriensystem gut auf unterschiedliche Situationen wie Einführung oder Anwendung einer Formel anwendbar ist.

Insgesamt sind die Übereinstimmungen insbesondere mit Blick auf die große Anzahl an Kategorien zufriedenstellend und sprechen für eine gute Güte der Codierungen und des Codierleitfadens. Durch den Prozess selbst konnte das Kategoriensystem außerdem weiter verbessert und der Codierleitfaden präzisiert werden.

C.2. Intracoderübereinstimmungen

Nach dem beschriebenen Vorgehen (vgl. Abschnitt C.1) wurde ein Teil der Daten von der Forscherin selbst mit 10 Monaten Abstand ein zweites Mal codiert. Es wurden 20 der insgesamt 92 Unterrichtsstunden zweitcodiert (21,7%). Diese entsprechen 451 der insgesamt 4740 transkribierten Unterrichtsminuten (9,5%). Hier wurden Stunden aller

solche Kategorien, die Kuckartz (2016, S.34) als „thematische Kategorien“ bezeichnet

² meint nach Kuckartz (2016, S.34) Kategorien, die über die reine Beschreibung der Daten hinausgehen und aus einer intensiven Beschäftigung mit den Daten oder der Theorie resultieren.

hospitierten Lehrkräfte aus verschiedenen Unterrichtsphasen und zu verschiedenen Formeln ausgewählt.

Tabelle C.3 zeigt die erhaltenen Übereinstimmungen. Die Übereinstimmungen sind insgesamt besser als die Intercoderübereinstimmungen. Auch die Unterschiede bei den unterschiedlichen Kategorienarten zeigen sich hier deutlich weniger stark, was auf das gleichbleibende theoretische Hintergrundwissen der Forscherin zurückzuführen ist. Lediglich die Oberkategorie *Formel wird gesprochen* weist eine deutlich bessere Übereinstimmung auf. Unterschiede zwischen den zwei Codierphasen sind vorrangig auf Flüchtigkeitsfehler zurückzuführen. Beim Vergleich der Codierungen zeigten sich Schwierigkeiten in der Unterscheidung der Kategorien *Anwendung / Experiment - genannt* und *Anwendung / Experiment - erklärt*, der Differenzierung der Aufgabenarten *Anwendungsaufgabe* und *Aufgabe ohne Kontext*, sowie der Unterscheidung zwischen der Kategorie *Modell* (der Elektronenleitung) und *Beschreibung einzelner Größen - elektrischer Widerstand - Behinderung*. Diese Kategorien liegen jeweils inhaltlich sehr nah beieinander.

	Übereinstimmung	Codings	Codes
insgesamt	84,75%	1239	104
Studententranskripte	83,19%	916	93
Tafelbilder	90,55%	201	37
Arbeitsblätter	86,89%	122	31
$R = \frac{U}{I}$	84,37%	531	44
Ohmsches Gesetz	86,49%	185	21
Widerstandsgesetz	84,51%	523	39
<i>Formel wird gesprochen</i>	92,82%	181	19
<i>Formel wird angewendet</i>	82,26%	851	62
<i>Über Formel wird gesprochen</i>	87,92%	207	23

Tabelle C.3.: Intracoderübereinstimmungen

D. Veranschaulichungen und Analysen zur Datenauswertung

D.1. Beschreibung der LehrerInnen im Hinblick auf Umfang des hospitierten Unterrichts und Anzahl codierter Textstellen

Bei den hospitierten LehrerInnen wurden unterschiedlich viele Stunden hospitiert. In der Regel wurden alle relevanten Unterrichtsstunden zum Thema Widerstand hospitiert, es kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass beispielsweise vor einer Klassenarbeit eine zusätzlich Übungsstunde zum Widerstand gemacht wurde, die nicht aufgezeichnet wurde. In einzelnen Fällen gab es Kommunikationsschwierigkeiten, was dazu führte, dass eine vorbereitende Stunde oder die erste Stunde zum Ohmschen Gesetz nicht hospitiert und aufgezeichnet wurden. Aus der folgenden Tabelle D.1 gehen diese Informationen sowie der zum Teil sehr unterschiedliche Umfang der hospitierten Stunden hervor. Die transkribierte Unterrichtszeit schwankt zwischen 123 Minuten bei Herrn Funke und 327 Minuten bei Frau Müller. Frau Müller hat mit insgesamt 431 Codings auch mit Abstand die meisten codierten Textstellen. Um die Analysen der Codehäufigkeiten bezogen auf die einzelnen LehrerInnen mit den transkribierten Unterrichtszeiten und der absoluten Codinganzahl der einzelnen LehrerInnen abgleichen zu können, werden beide Größen in Diagramm D.1 beziehungsweise D.2 graphisch dargestellt.

Deutliche Unterschiede zeigen sich, wenn man die Anzahl der Codierungen auf den insgesamt hospitierten Unterricht bezieht. Diese Unterschiede sind vor allem auf unterschiedliche Gestaltung des Unterrichtes zurückzuführen. Werden beispielsweise viele Schülerexperimente gemacht, hat der Lehrer oder die Lehrerin in dieser Unterrichtsohase in der Regel nur sehr geringe Sprechanteile, was zu wenig Text führt, der überhaupt codiert werden kann. Aus diesem Grund wurde der Unterricht bei der transkribierten Unterrichtszeit auf die Stundenanteile reduziert, die für die Fragestellung der Erhebung überhaupt ergiebig sind (inhaltlich und methodisch). Die daraus entstandene bereinigte Codingdichte „N / transkribierte Minute“ ist somit deutlich aufschlussreicher und zeigt auch deutlich geringere Schwankungen. Alle LehrerInnen haben somit im Verhältnis gesehen etwa gleich oft (minimal einmal pro transkribierter Minute, maximal 1,7 mal pro transkribierter Minute) relevante Äußerungen zu den

Lehrer	Jasper	Schmitt	Lenz	Funke	Berger	Carle	Gerber	Meyer	Weber	Müller
Gym	✓	✓	✓	✓						
MS					✓	✓	✓	✓	✓	✓
w					✓	✓	✓			✓
m	✓	✓	✓	✓				✓	✓	
Stundenlänge	45	60	90	45	90	45	90	45	45	90
hosp. Stunden	6	9	6	6	5	10	5	10	10	7
transkrib. Zeit	157	284	128	123	209	160	172	203	161	327
Codings N	235	271	194	159	262	267	237	266	175	446
N / hosp. Min.	0,9	0,0 (0,002)	0,4	0,6	0,6	0,6	0,5	0,6	0,4	0,7
N / transkrib. Min.	1,5	1,0	1,5	1,3	1,3	1,7	1,4	1,3	1,1	1,3
Fehlstunden	X		X					X		

Tabelle D.1.: Beschreibung des Umfangs der Erhebung nach LehrerInnen

Formeln gemacht.

Alle Zeiten in der Tabelle werden in Minuten angegeben. In der Zeile „fehlende Stunden“ wurde ein Kreuz gesetzt, wenn einzelne Stunden nicht hospitiert werden konnten. Im folgenden wird näher beschrieben, was in den fehlenden Stunden thematisiert wurde:

- Bei Herrn Jasper wurde in einer Stunde vor der Hospitation die Einführung des Widerstandes mit einem Experiment motiviert und anschließend als Hausaufgabe die Größe mit Hilfe des Lehrbuches eingeführt.
- Herr Meyer behandelte vor der Hospitation in einer Unterrichtsstunde das Ohmsche Gesetz.
- Herr Lenz führte in der Stunde vor der Hospitation den Begriff Widerstand ein, ohne ihn physikalisch näher zu erläutern, und bereite das Schülerexperiment vor, das in der ersten hospitierten Unterrichtsstunde durchgeführt wurde.

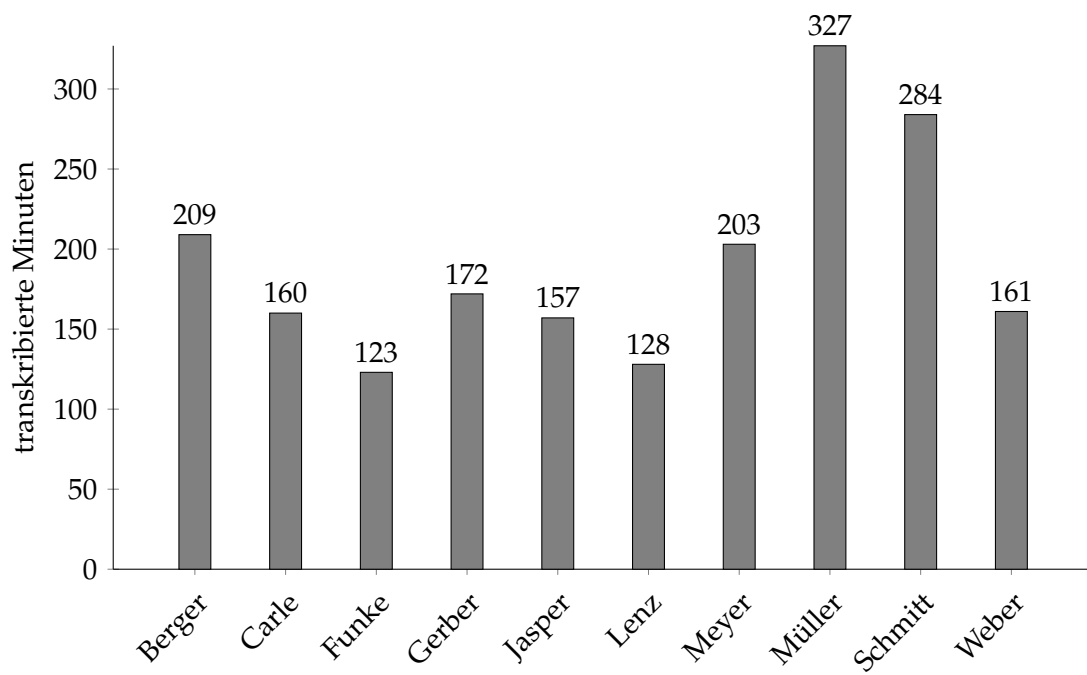


Abbildung D.1.: Transkribierte Unterrichtszeit der einzelnen LehrerInnen

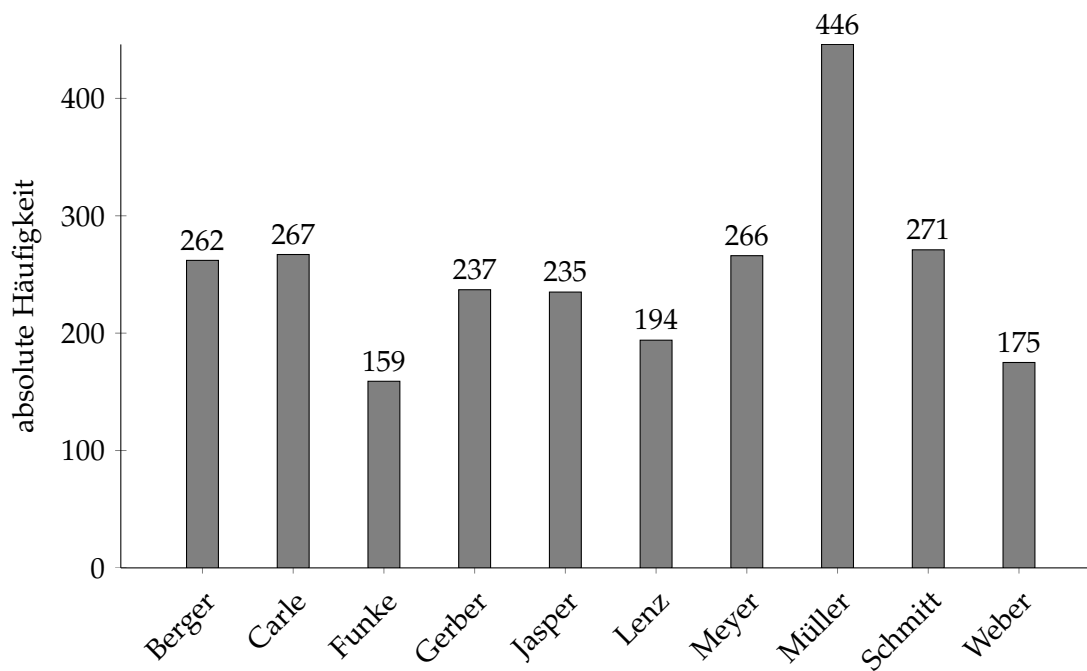


Abbildung D.2.: Absolute Anzahl der Codings für einzelne LehrerInnen

D.2. Häufigkeitsanalysen LehrerInnen Kategorie *Formel wird gesprochen*

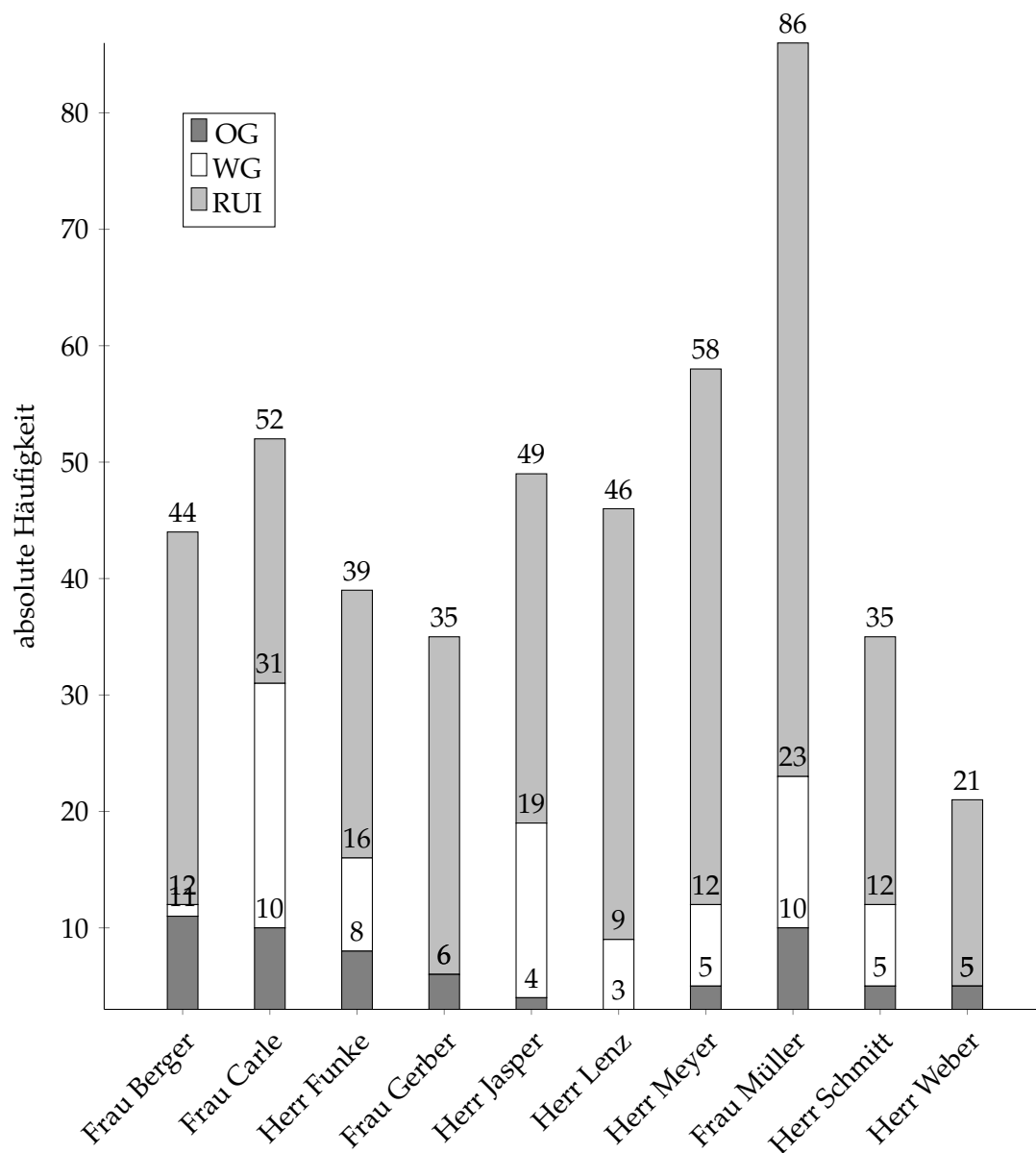
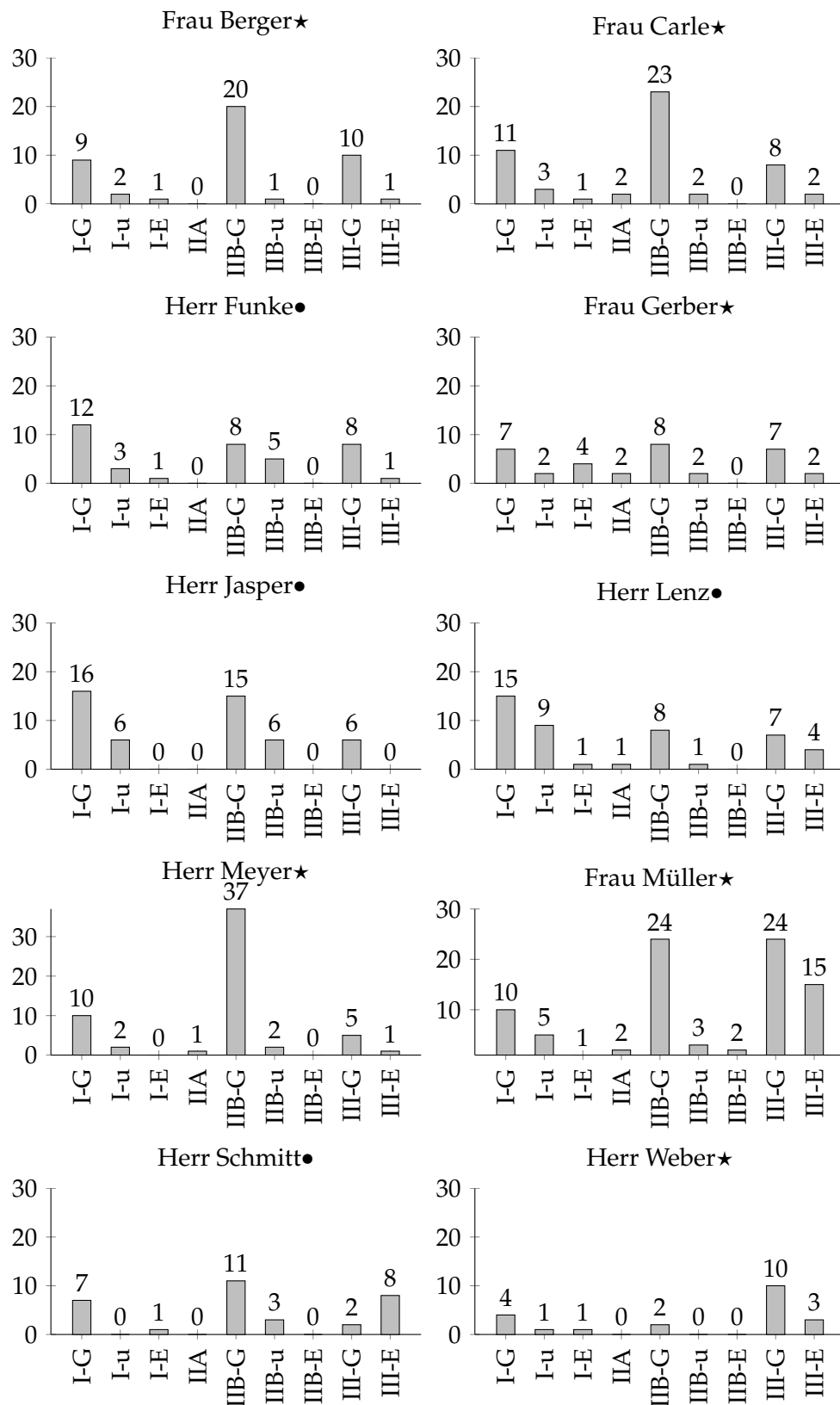


Abbildung D.3.: Codehäufigkeiten zu *Formel wird gesprochen* für einzelne LehrerInnen

Abbildung D.4.: Codehäufigkeiten der Unterkategorien von *Formel wird gesprochen* für einzelne LehrerInnenI-III...Ebenen, G...Größe, u...umgestellt (inkl. $\frac{u}{I} = konst.$), E...Einheit

●...Gymnasium, ★...Mittelschule

D.3. Häufigkeitsanalysen LehrerInnen Kategorie *Formel wird angewendet oder interpretiert*

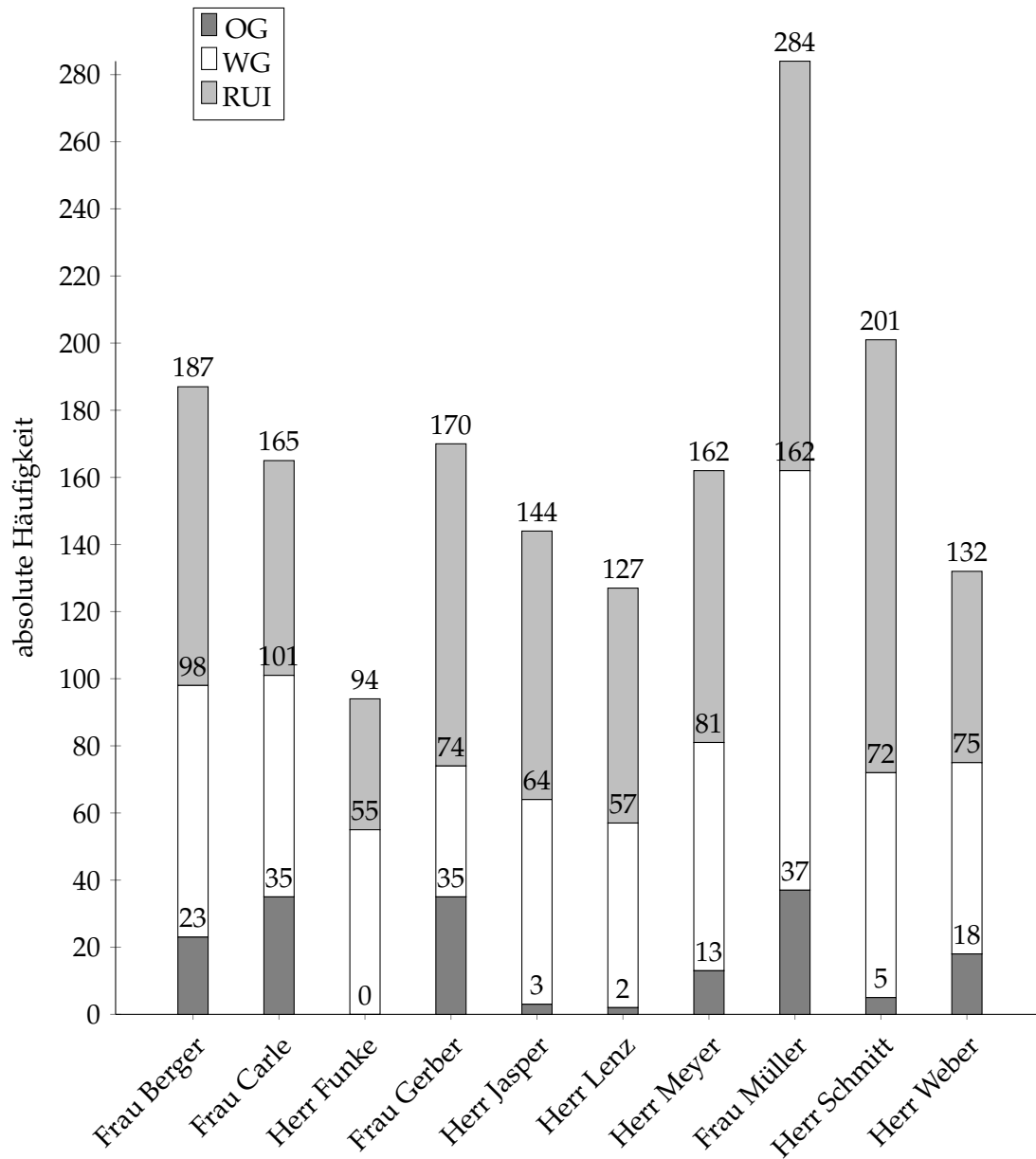


Abbildung D.5.: Codehäufigkeiten zu *Formel wird angewendet oder interpretiert* für einzelne LehrerInnen

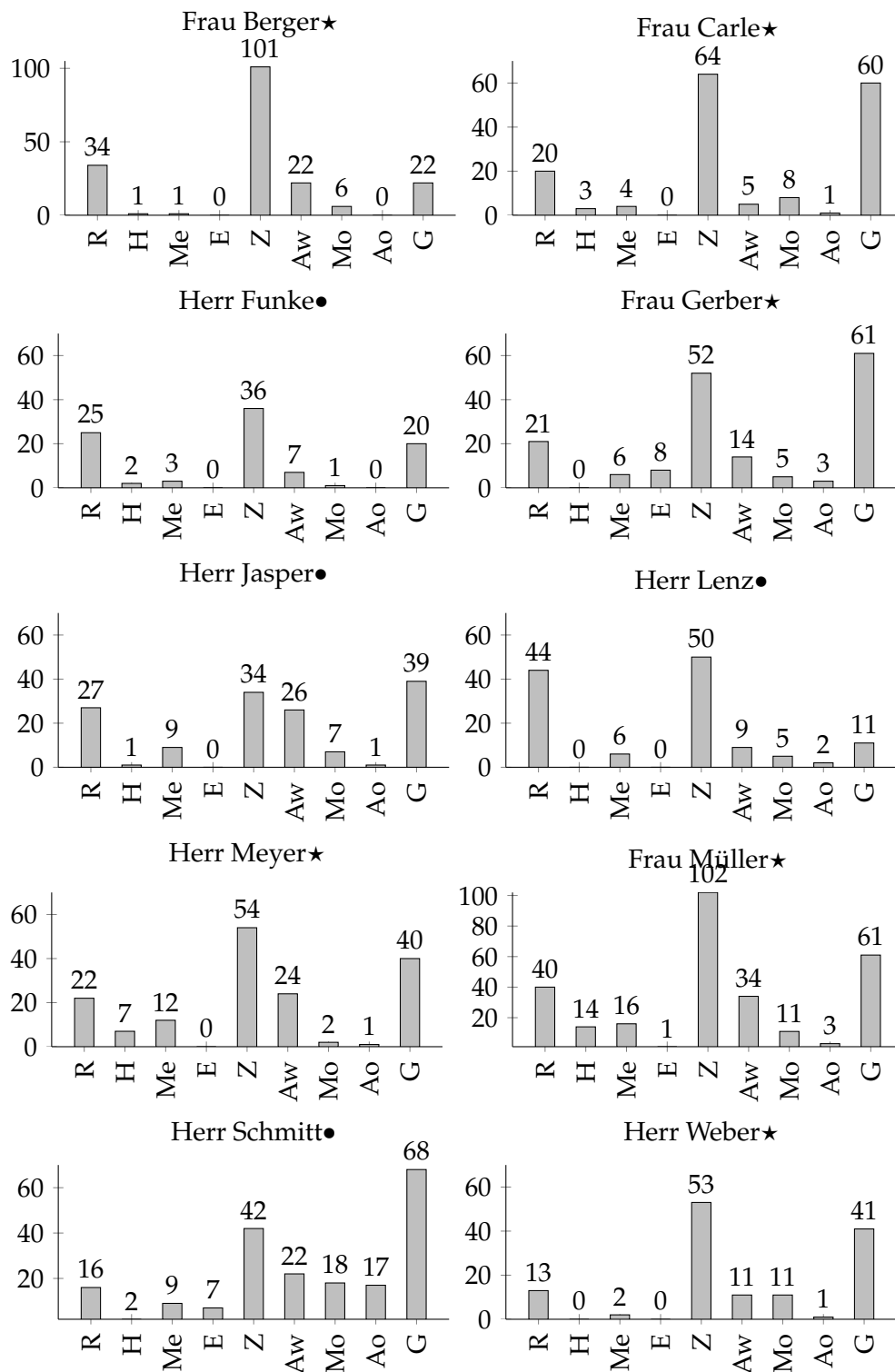


Abbildung D.6.: Codehäufigkeiten der Unterkategorien von *Formel wird angewendet oder interpretiert* für einzelne LehrerInnen

R...Rechnung, H...Herleitung, Me...Messprinzip, E...Beschreibung der Einheit, Z...Zusammenhang zwischen den Größen, Aw...Anwendung, Mo...Modell, Ao...Analogie, G...Beschreibung einzelner Größen
 ●...Gymnasium, ★...Mittelschule

D.3.1. Häufigkeitsanalysen LehrerInnen Unterkategorie *Rechnung*

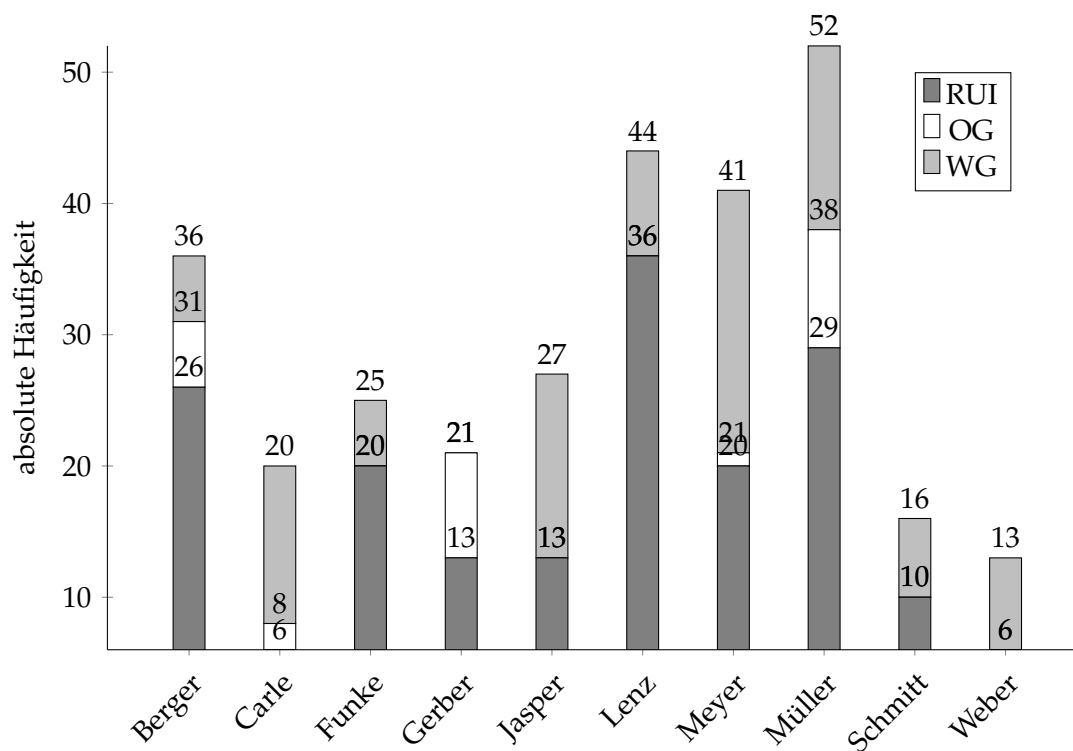


Abbildung D.7.: Codehäufigkeiten zu *Rechnung* für einzelne LehrerInnen

	Berger	Carle	Funke	Gerber	Jasper	Lenz	Meyer	Müller	Schmitt	Weber
N_{ges}	262	267	159	267	235	194	266	446	271	175
$N_{\text{angewendet}}$	187	165	94	170	144	127	162	284	201	132
N_{Rechnung}	36	20	25	21	27	44	41	52	16	13
$\frac{N_{\text{Rechnung}}}{N_{\text{ges}}}$	14%	7%	16%	8%	11%	23%	15%	12%	6%	7%
$\frac{N_{\text{Rechnung}}}{N_{\text{angewendet}}}$	19%	12%	27%	12%	19%	35%	25%	18%	8%	10%

Tabelle D.2.: Relative Codehäufigkeiten für *Rechnung* für einzelne LehrerInnen

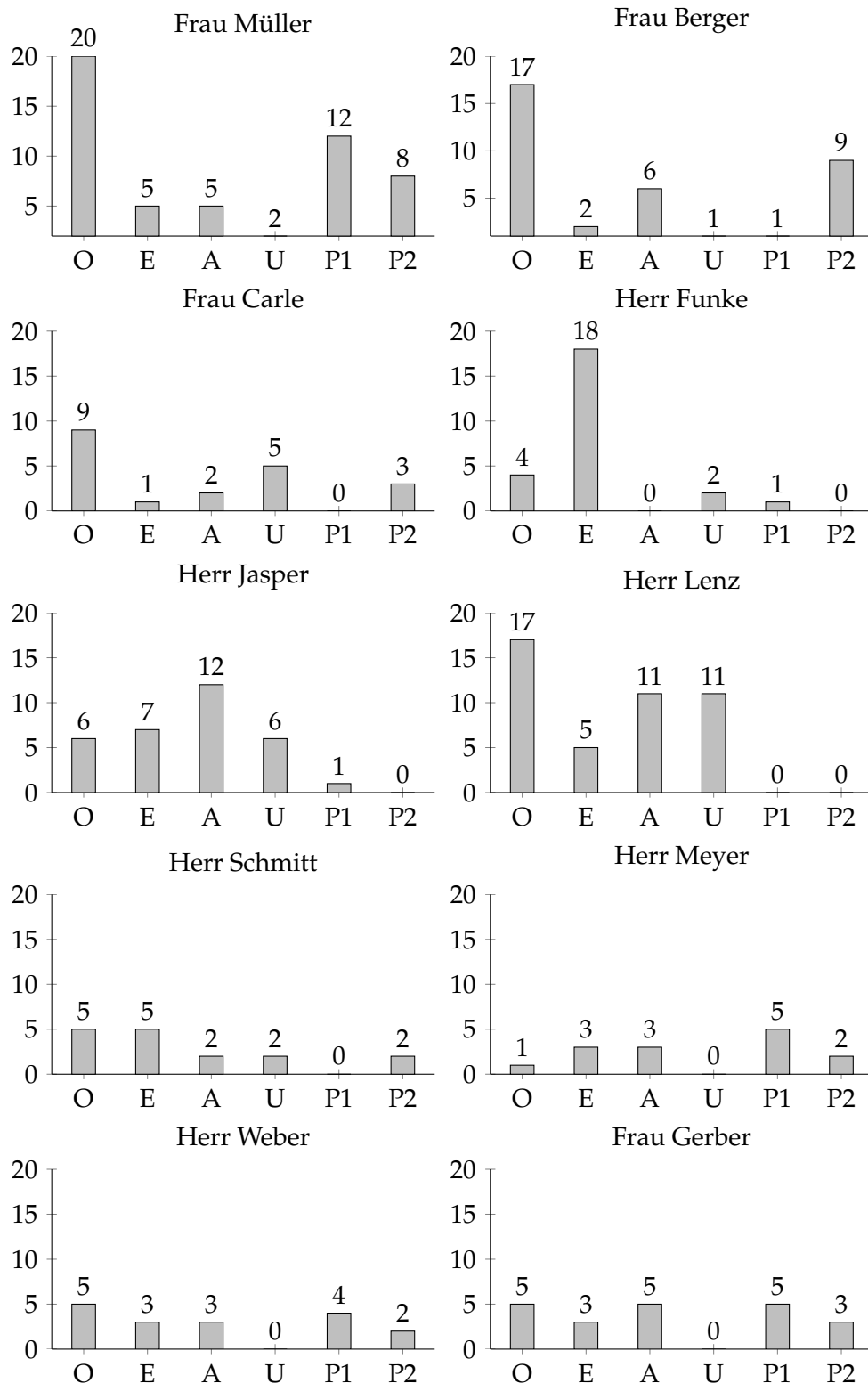
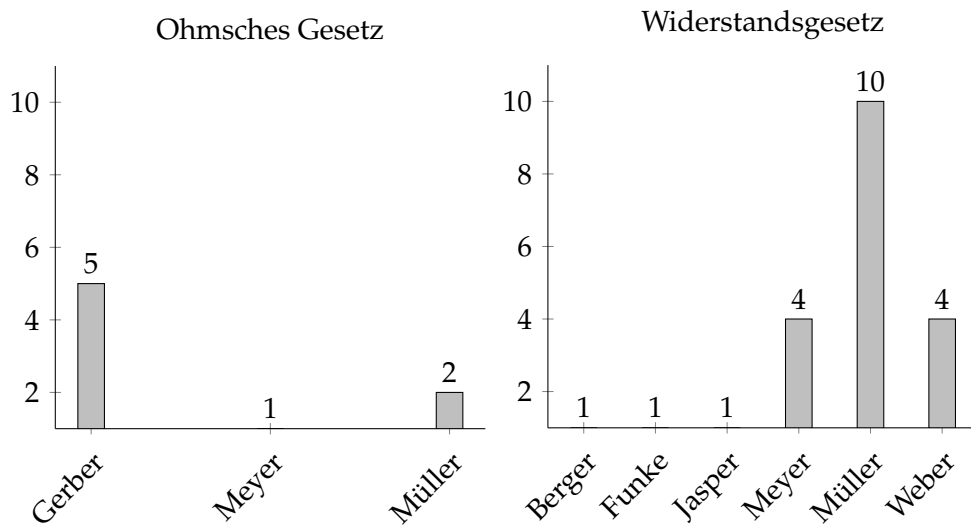
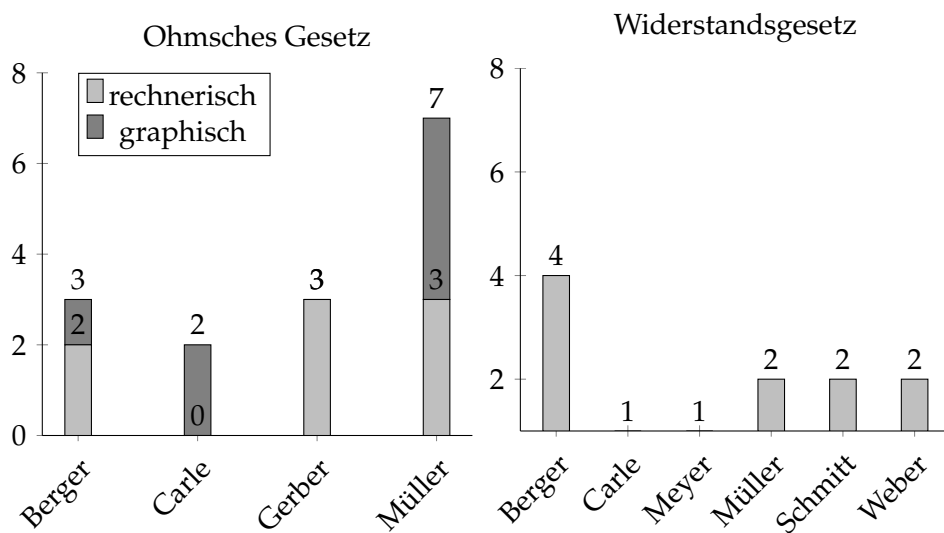


Abbildung D.8.: Codehäufigkeiten der Unterkategorien von *Rechnung* für einzelne LehrerInnen

O...Ohne Kontext, E...experimentelle Werte, A...Anwendungsaufgabe, U...Formel umstellen, P1...Proportionalität: Werte ermitteln, P2...Proportionalität: Werte überprüfen

Abbildung D.9.: Codehäufigkeiten von *Rechnung - Proportionalität*: Werte ermittelnAbbildung D.10.: Codehäufigkeiten von *Rechnung - Proportionalität*: Werte überprüfen

D.3.2. Häufigkeitsanalysen LehrerInnen Unterkategorie *Anwendung* oder *Experiment*

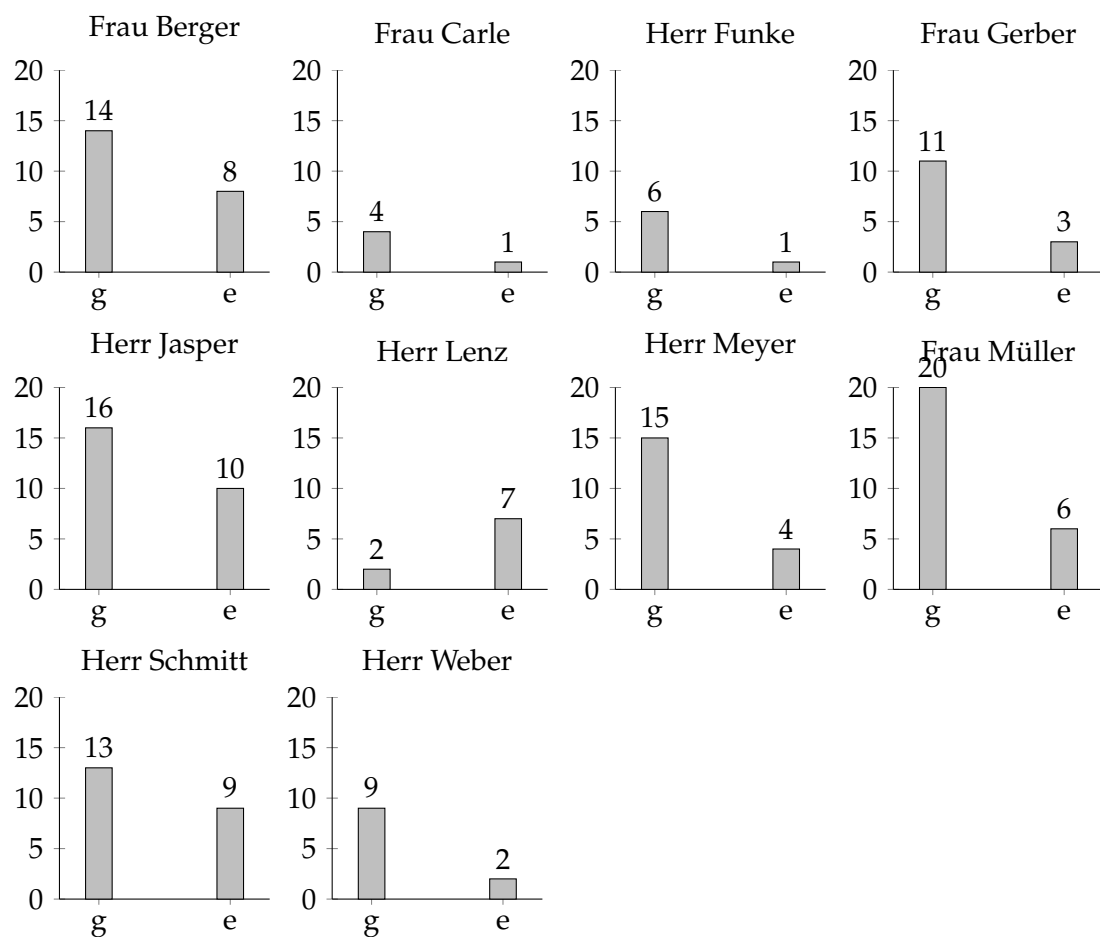


Abbildung D.11.: Codehäufigkeiten der Unterkategorien von *Anwendung* oder *Experiment* für einzelne LehrerInnen
g...genannt, e...erklärt

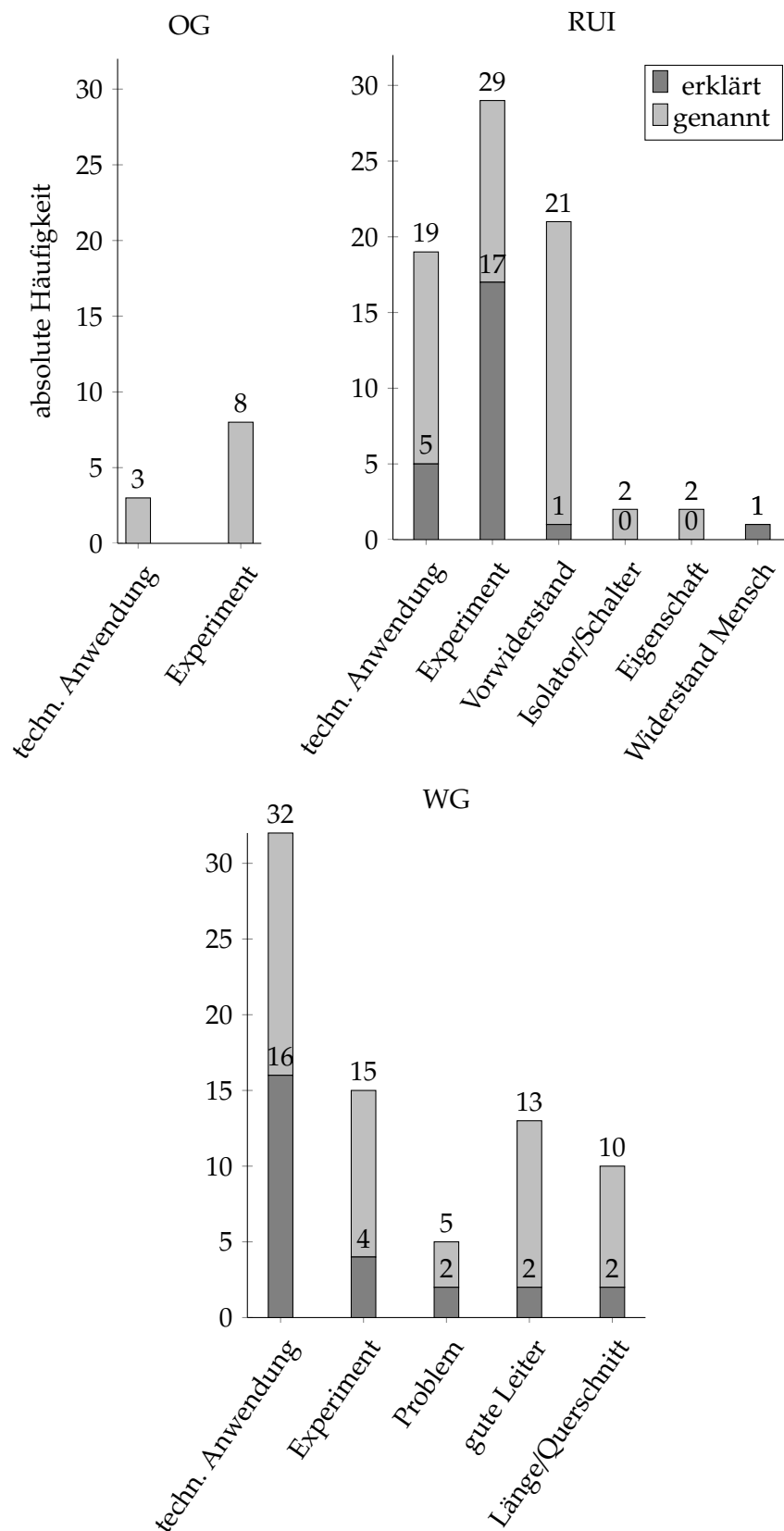


Abbildung D.12.: Codehäufigkeiten verschiedener Ausprägungen von *Anwendung* oder *Experiment*: genannt und *Anwendung* oder *Experiment*: erklärt

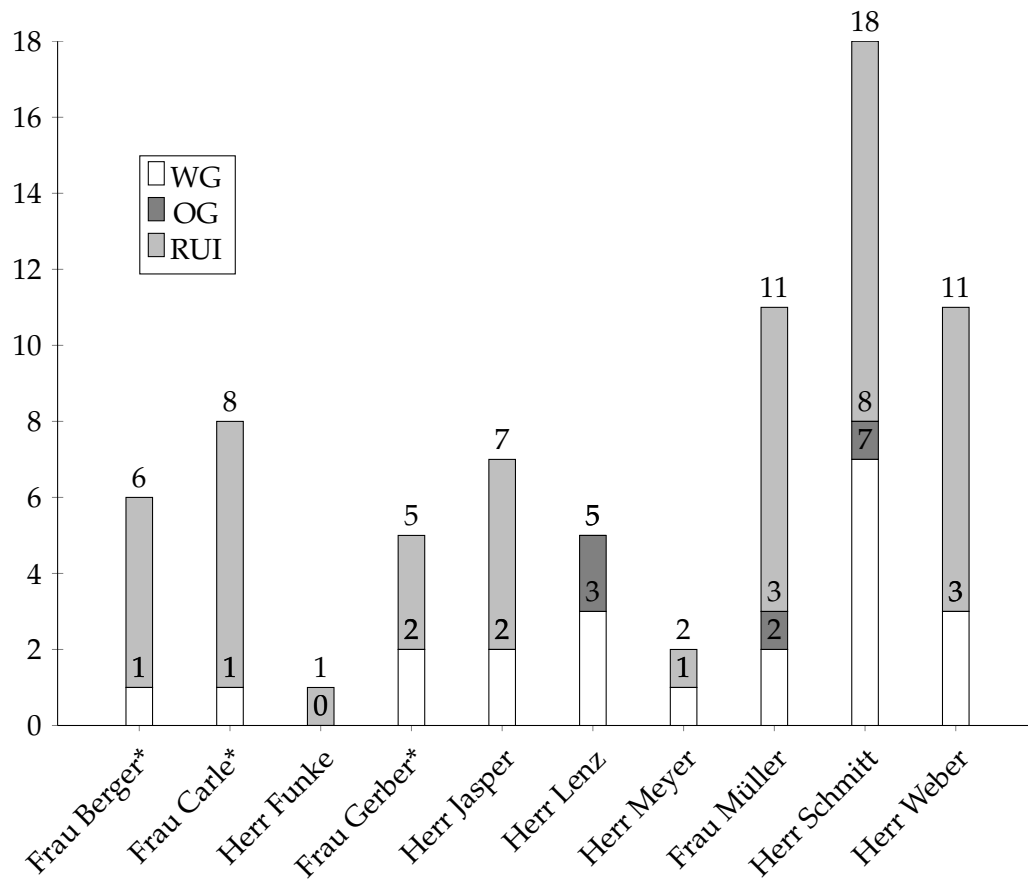


Abbildung D.13.: Codehäufigkeiten Modell bei einzelnen LehrerInnen
 *... lassen Stromfluss als Analogiespiel nachspielen

D.3.3. Häufigkeitsanalysen LehrerInnen Unterkategorie *Beschreibung einzelner Größen*

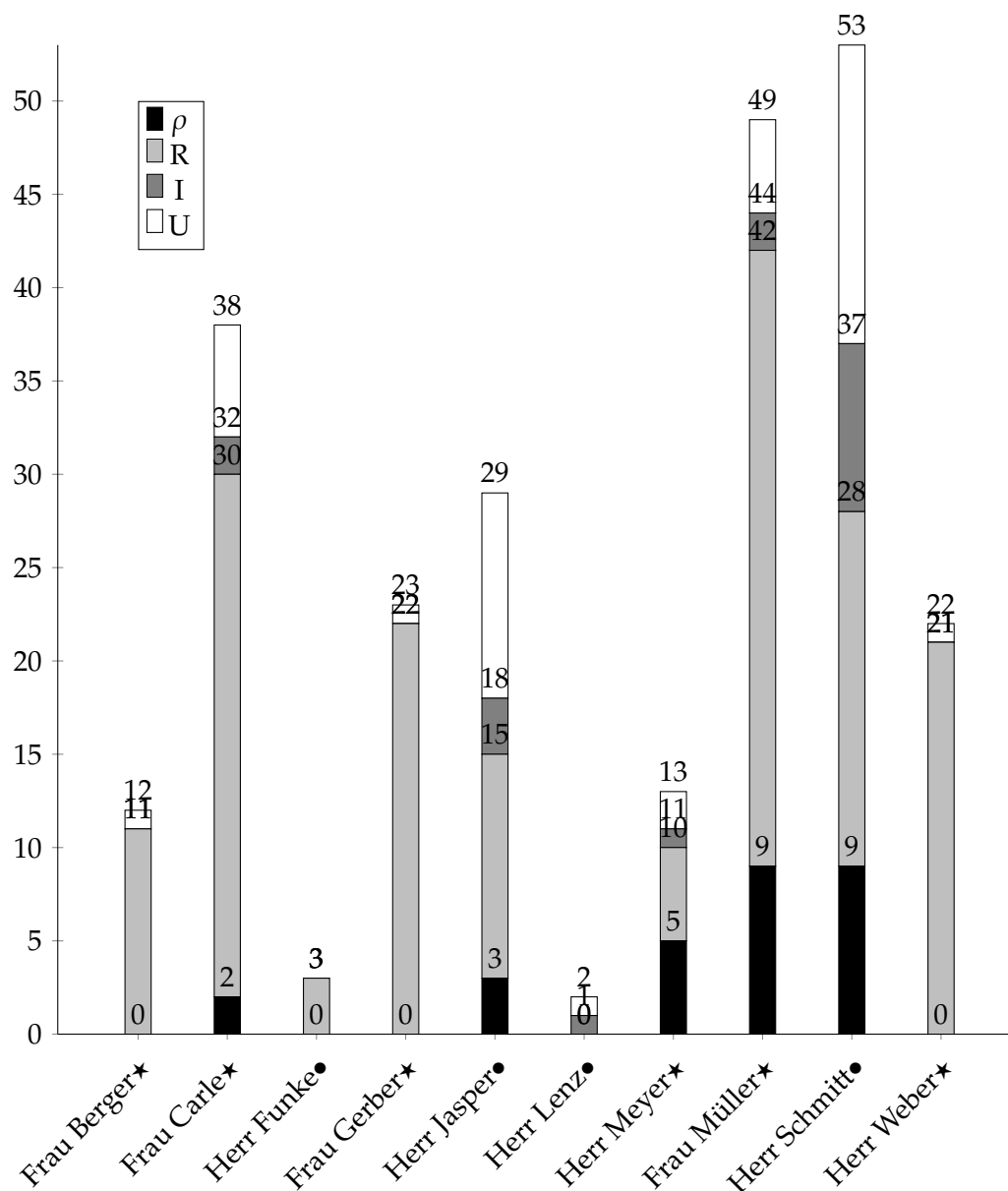


Abbildung D.14.: Codehäufigkeiten Beschreibung einzelner Größen für Größen Widerstand R , Spannung U , Stromstärke I und spezifischen elektrischen Widerstand ρ , ●...Gymnasium, ★...Mittelschule

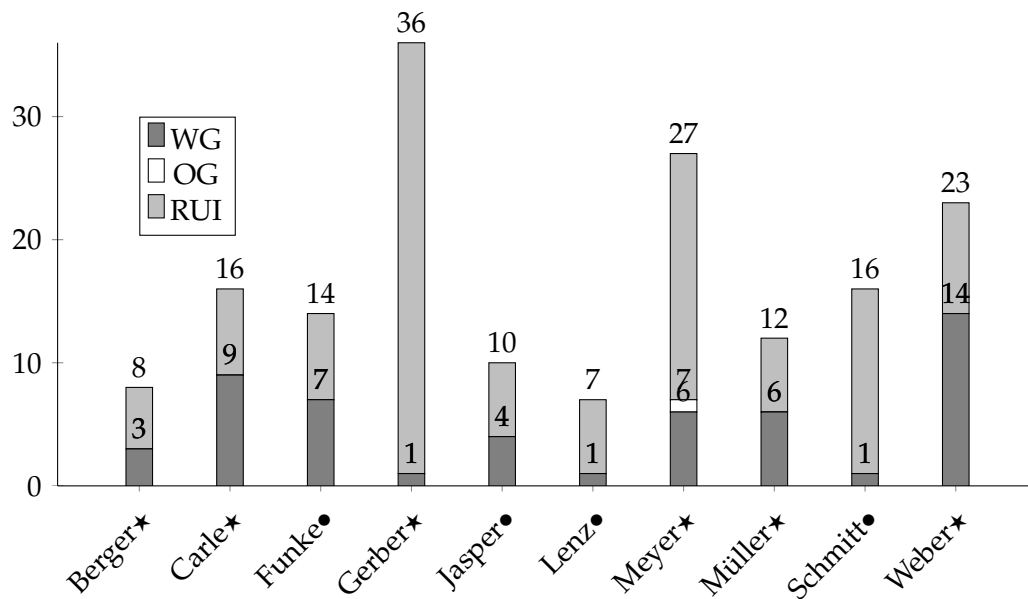


Abbildung D.15.: Codehäufigkeiten Beschreibung einzelner Größen für Größe-Formelzeichen-Einheit verteilt auf die einzelnen LehrerInnen
 ●...Gymnasium, ★...Mittelschule

D.3.4. Verteilung der Codings *Analogie* auf LehrerInnen

Kategorie \ Lehrer	Lehrer	Schmitt	Müller	Gerber	Lenz	Weber	Jasper	Carle
RUI-Straße	7	2	2		1			
RUI-Reibung	2			1		1	1	
RUI-sonst.	5			1				
WG-Hindernisse	2	1						
WG-Rohr	1		1					

Tabelle D.3.: Verteilung der für *Analogie* codierten Textstellen auf einzelne LehrerInnen.
 Die nicht aufgeführten LehrerInnen haben keine Analogien genutzt.

D.3.5. Codehäufigkeiten *Zusammenhang zwischen den Größen*

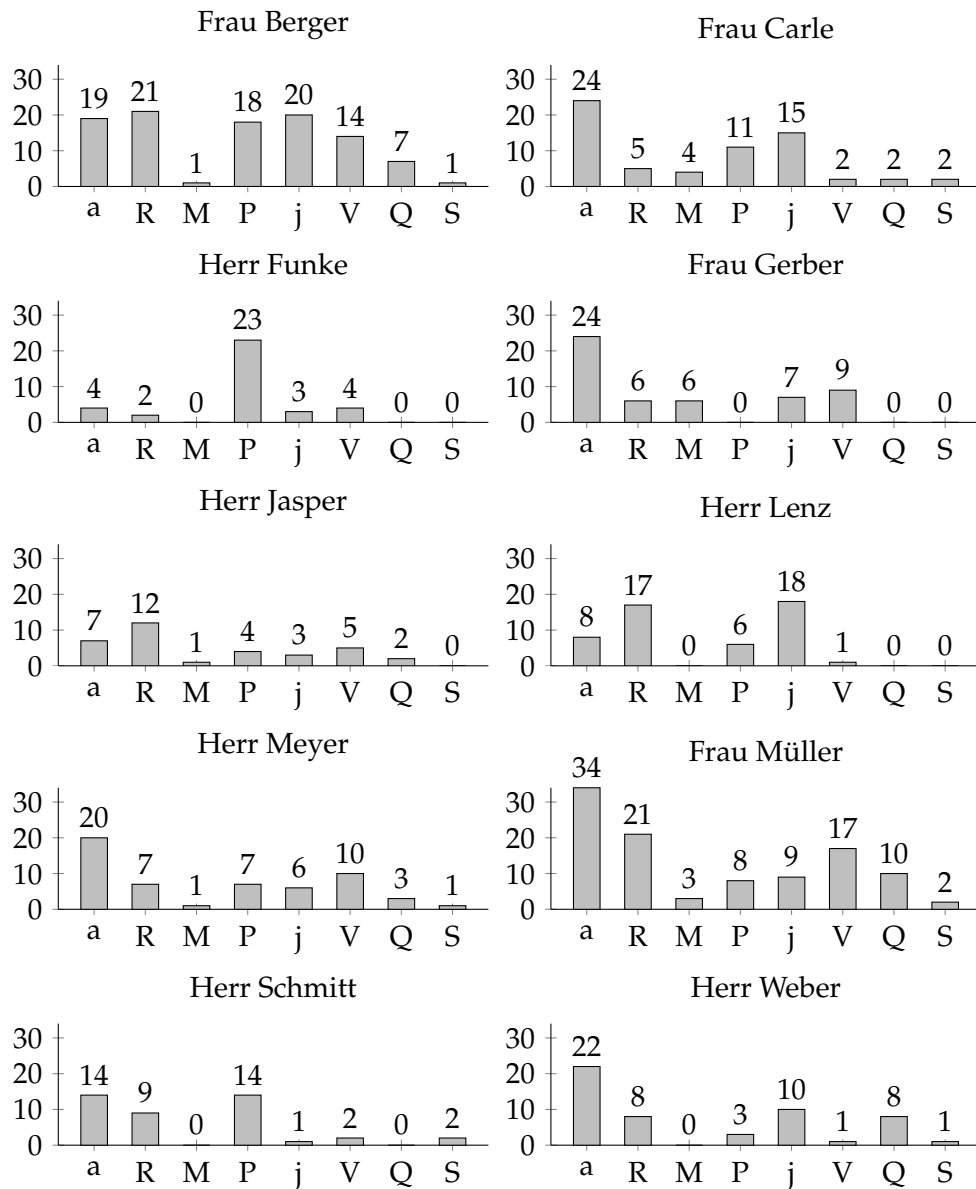
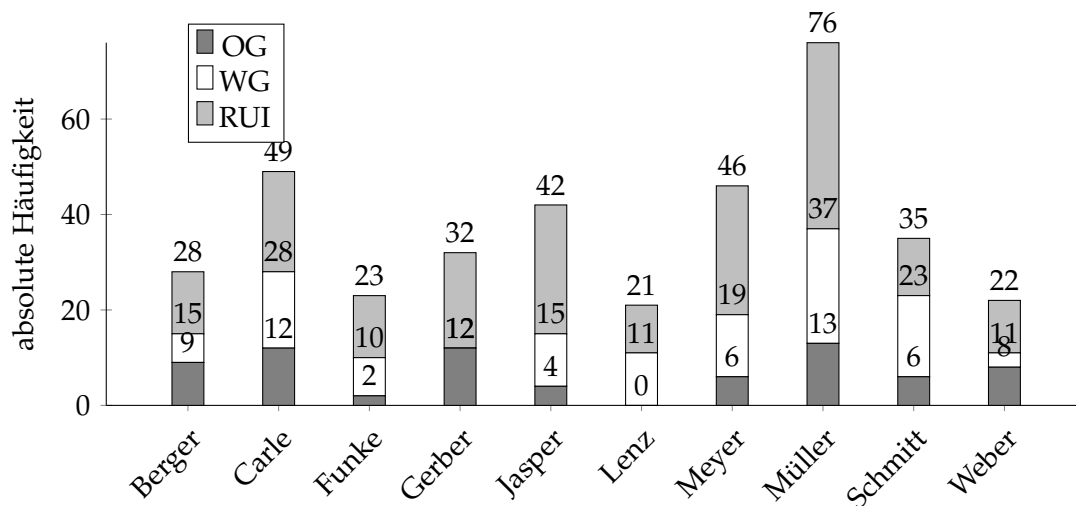


Abbildung D.16.: Codehäufigkeiten der Unterkategorien von *Zusammenhang zwischen den Größen* für einzelne LehrerInnen

a...abhängig von, R...Veränderung in gleiche/unterschiedliche Richtung, M...Veränderung in gleichem/umgekehrtem Maß, P...Proportionalität, j...je-desto, V...Verdoppelung usw., Q...Quotienten-/Produktgleichheit, S...Spezial-/Grenzfälle

D.4. Häufigkeitsanalysen LehrerInnen Kategorie *Über Formel wird gesprochen*

Abbildung D.17.: Codehäufigkeiten *Über Formel wird gesprochen* einzelne LehrerInnen

Kategorie \ Lehrer	Berger	Carle	Funke	Gerber	Jasper	Lenz	Meyer	Müller	Schmitt	Weber	tritt auf bei
Klassifiz.	3	6	0	7	1	0	1	2	3	4	8/10
Sprache	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0/10
Vorteile	2	3	0	0	0	0	0	3	1	0	4/10
Merkhilfe	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0/10
Analogie	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0/10
Exp-Theo	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	2/10
Gültigk.b.	4	2	2	5	3	0	5	7	2	4	9/10
Anw.b.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0/10

Tabelle D.4.: Verteilung der Codings in der Kategorie *Über Formel wird gesprochen* auf einzelne LehrerInnen für das Ohmsche Gesetz $I \sim U$

Kategorie \ Lehrer	Berger	Carle	Funke	Gerber	Jasper	Lenz	Meyer	Müller	Schmitt	Weber	tritt auf bei
Klassifiz.	8	7	2	14	20	6	18	22	3	8	10/10
Sprache	2	3	3	4	0	0	2	6	4	2	8/10
Vorteile	2	2	0	0	2	1	3	6	0	1	7/10
Merkhilfe	0	0	6	2	2	0	0	3	0	0	4/10
Analogie	0	5	0	0	0	2	1	0	4	0	4/10
Exp-Theo	1	4	2	0	1	0	0	2	0	0	5/10
Gültigk.b.	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	2/10
Anw.b.	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	2/10
Gleichung	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	1/10

Tabelle D.5.: Verteilung Codings *Über Formel wird gesprochen* für $R = \frac{U}{I}$

Kategorie \ Lehrer	Berger	Carle	Funke	Gerber	Jasper	Lenz	Meyer	Müller	Schmitt	Weber	tritt auf bei
Klassifiz.	2	9	4	0	4	5	5	17	6	0	8/10
Sprache	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1/10
Vorteile	3	2	2	0	3	2	2	6	2	1	9/10
Merkhilfe	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0/10
Analogie	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0/10
Exp-Theo	0	2	0	0	0	0	3	0	5	1	4/10
Gültigk.b.	1	1	0	0	1	0	0	0	2	1	5/10
Anw.b.	0	1	2	0	3	4	3	1	2	0	7/10

Tabelle D.6.: Verteilung Codings *Über Formel wird gesprochen* für WG

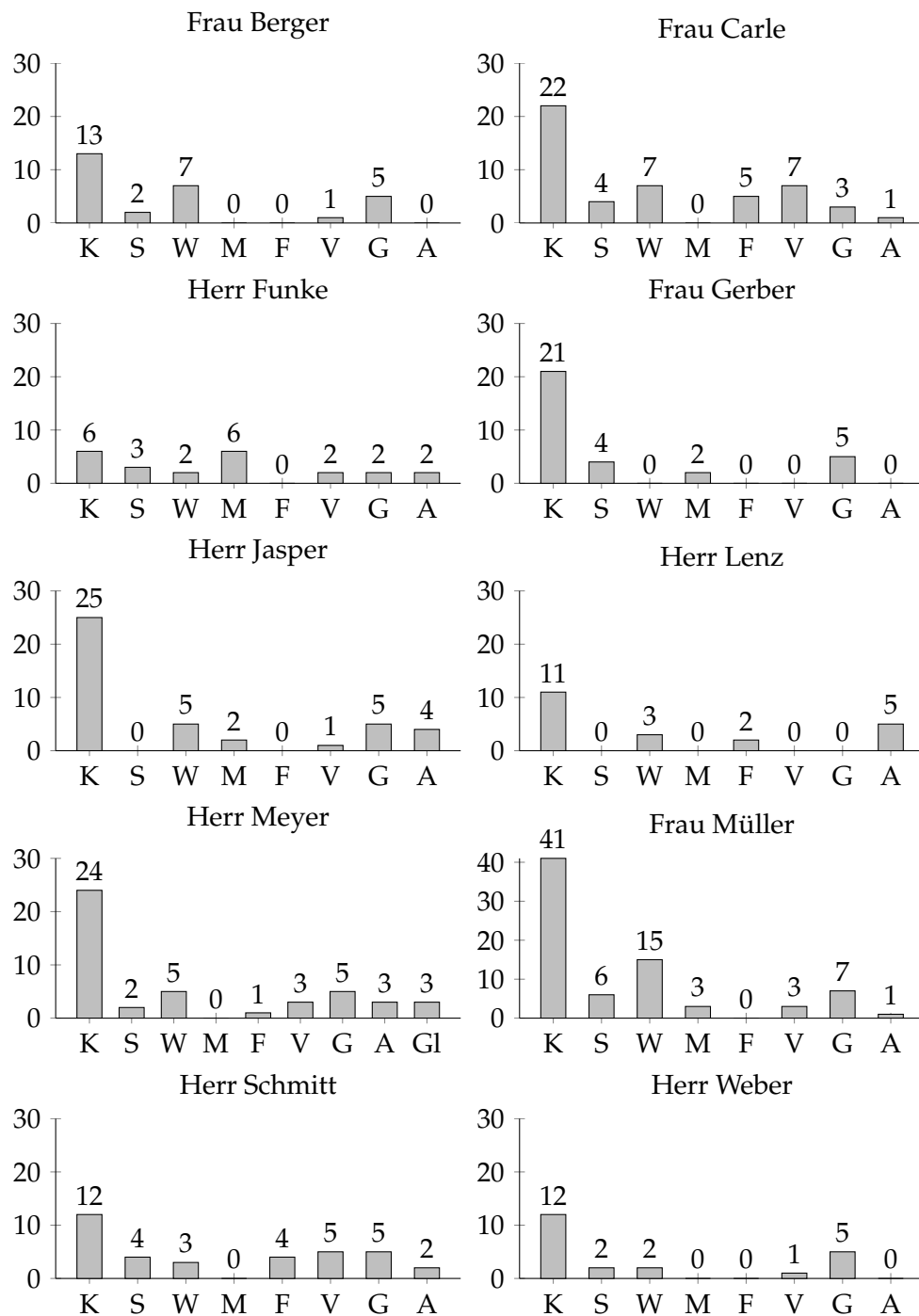


Abbildung D.18.: Codehäufigkeiten der Unterkategorien von *Über die Formel wird gesprochen* für einzelne LehrerInnen

K...Klassifizierung, S...Meta Sprache, W...Wichtigkeit/Vorteile,
M...Merkhilfe, F...Analogie andere Formel, V...Vgl. Exp.-Theorie,
G...Gültigkeitsbedingung, A...Anwendungsbereich/Theorie,
Gl...Gleichung

D.4.1. Häufigkeitsverteilungen LehrerInnen Unterkategorie *Wichtigkeit oder Vorteile einer Formel*

Ausprägung \ Lehrer	Berger	Carle	Funke	Gerber	Jasper	Lenz	Meyer	Müller	Schmitt	Weber	tritt auf bei
merken	0	2	0	0	1	1	4	5	0	0	6/10
genau	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	3/10
machen	0	2	0	0	0	1	0	5	0	1	4/10
wichtig	3	2	2	0	0	1	0	3	3	0	7/10
Prüfung	3	0	0	0	3	0	1	4	0	0	5/10

Tabelle D.7.: Verteilung der inhaltlichen Ausprägungen in der Kategorie *Wichtigkeit oder Vorteile einer Formel* auf die einzelnen LehrerInnen

D.4.2. Häufigkeitsverteilungen LehrerInnen Unterkategorie *Erkenntnistheoretische Klassifizierung einer Formel*

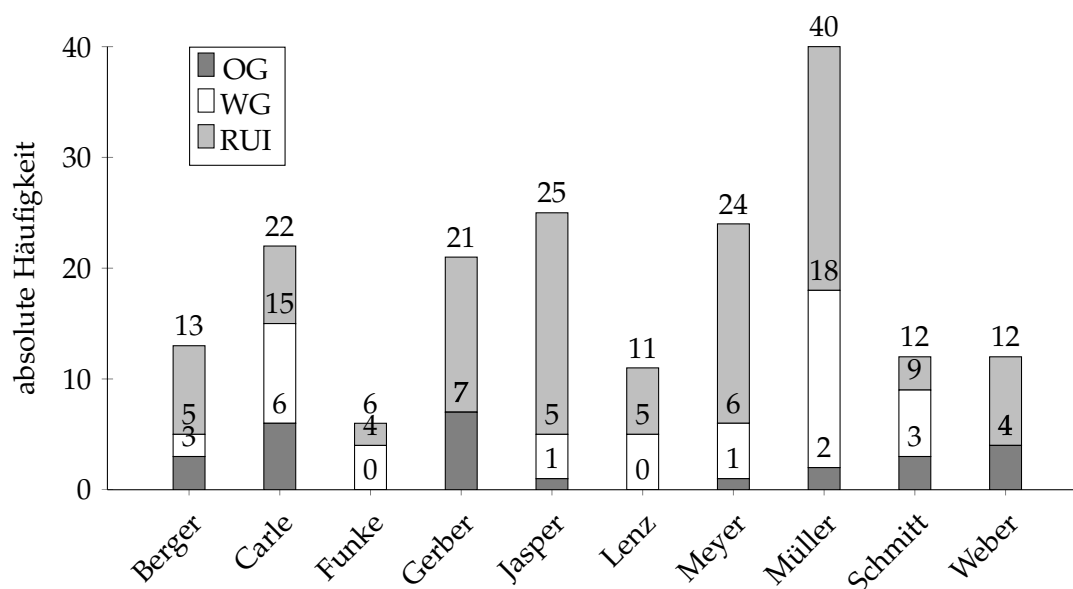


Abbildung D.19.: Codehäufigkeiten zu *Erkenntnistheoretische Klassifizierung einer Formel* für einzelne LehrerInnen

Klassifiz.	Lehrer	Berger	Carle	Funke	Gerber	Jasper	Lenz	Meyer	Müller	Schmitt	Weber	tritt auf bei
Berechnung		5	4	2	10	13	5	14	16	3	6	10/10
Kurzform		1	2	0	3	0	1	1	5	0	0	6/10
Definition		1	1	0	1	3	0	3	1	0	2	7/10
formal geg.		0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	1/10
Gesetz		1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1/10
Verallg.		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0/10

Tabelle D.8.: Verteilung der Codings in der Unterkategorie *Klassifizierung* auf einzelne LehrerInnen für die Definitionsformel $R = \frac{U}{I}$

Klassifiz.	Lehrer	Berger	Carle	Funke	Gerber	Jasper	Lenz	Meyer	Müller	Schmitt	Weber	tritt auf bei
Berechnung		1	4	2	0	2	3	3	11	4	0	8/10
Kurzform		0	2	1	0	0	0	2	3	0	0	4/10
Definition		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0/10
formal geg.		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0/10
Gesetz		1	3	1	0	2	2	0	2	2	0	7/10
Verallg.		0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1/10

Tabelle D.9.: Verteilung der Codings in der Unterkategorie *Klassifizierung* auf einzelne LehrerInnen für das Widerstandsgesetz $R = \varrho \cdot \frac{I}{A}$

Klassifiz.	Lehrer	Berger	Carle	Funke	Gerber	Jasper	Lenz	Meyer	Müller	Schmitt	Weber	tritt auf bei
Berechnung		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0/10
Kurzform		2	2	0	0	0	0	0	1	1	2	5/10
Definition		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0/10
formal geg.		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0/10
Gesetz		1	4	0	7	1	0	1	0	2	2	7/10
Verallg.		0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1/10

Tabelle D.10.: Verteilung der Codings in der Unterkategorie *Klassifizierung* auf einzelne LehrerInnen für das Ohmsche Gesetz $I \sim U$

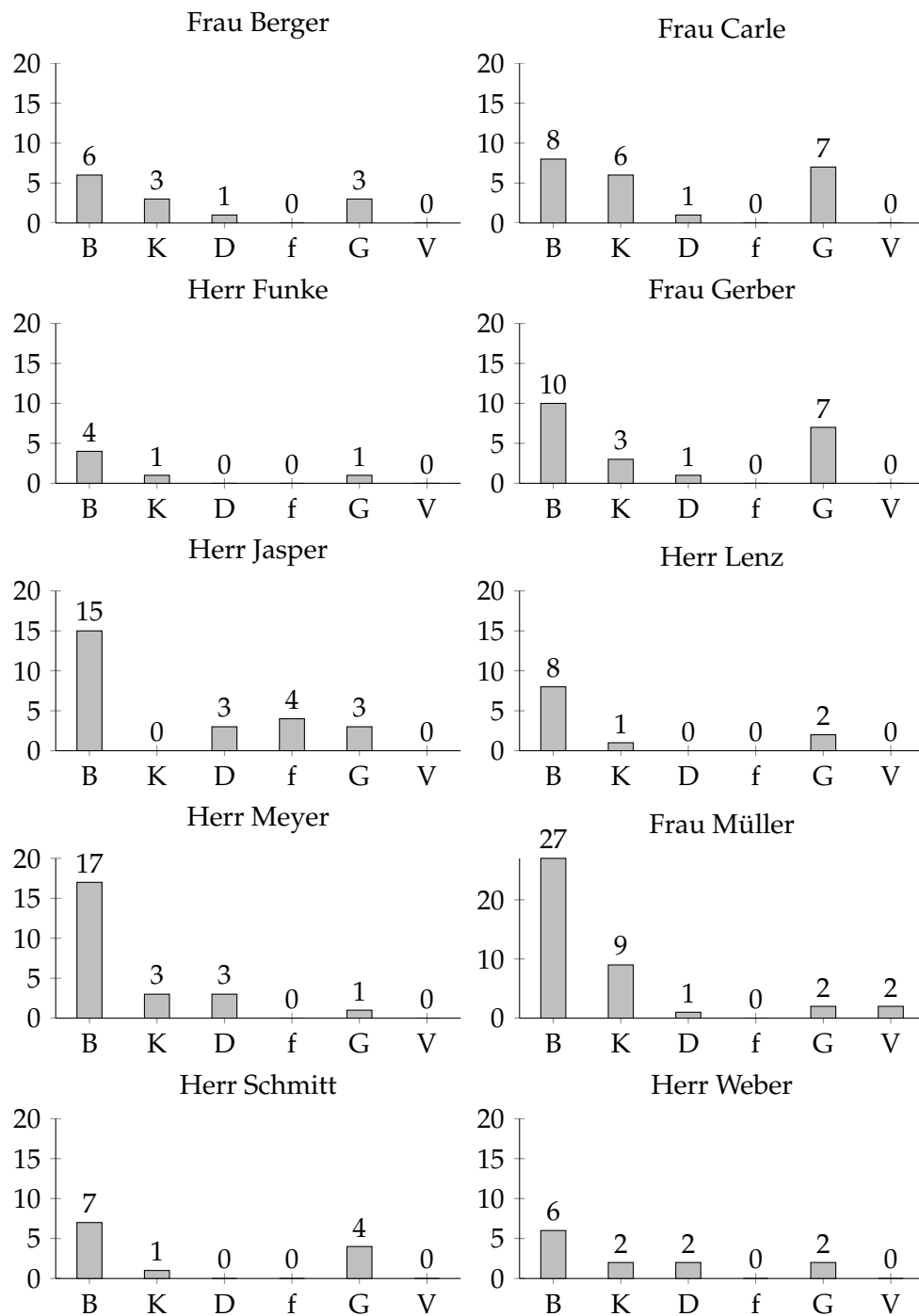


Abbildung D.20.: Codehäufigkeiten der Unterkategorie *Klassifizierung der Formel* für einzelne LehrerInnen
 B...Berechnung, K...Kurzform, D...Definition, f...formal gegeben, G...empirisches Gesetz, V...Verallgemeinerung

D.5. Häufigkeiten der Ebenen des Ebenenmodells

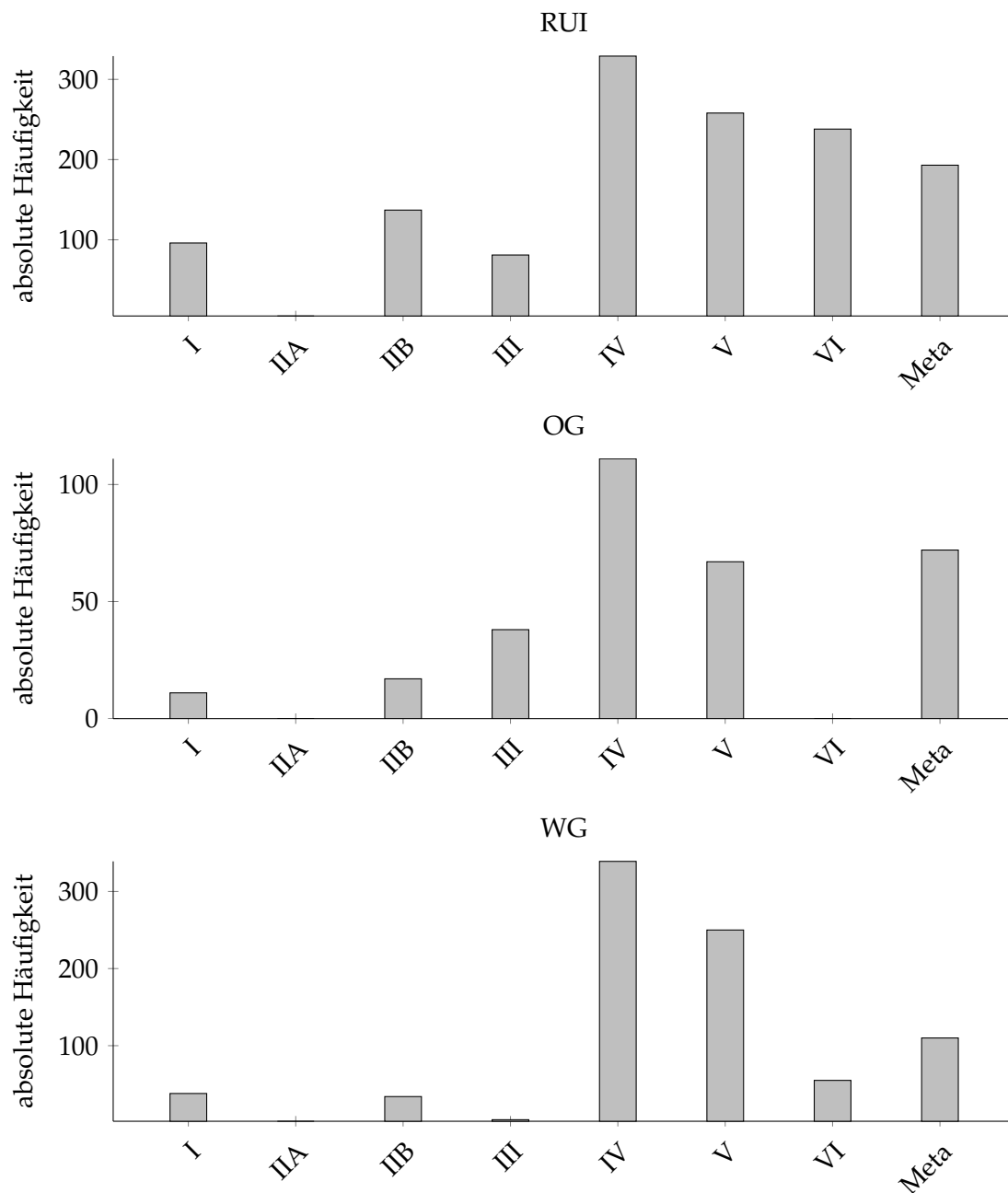


Abbildung D.21.: Codehäufigkeiten der Ebenen des Ebenenmodells

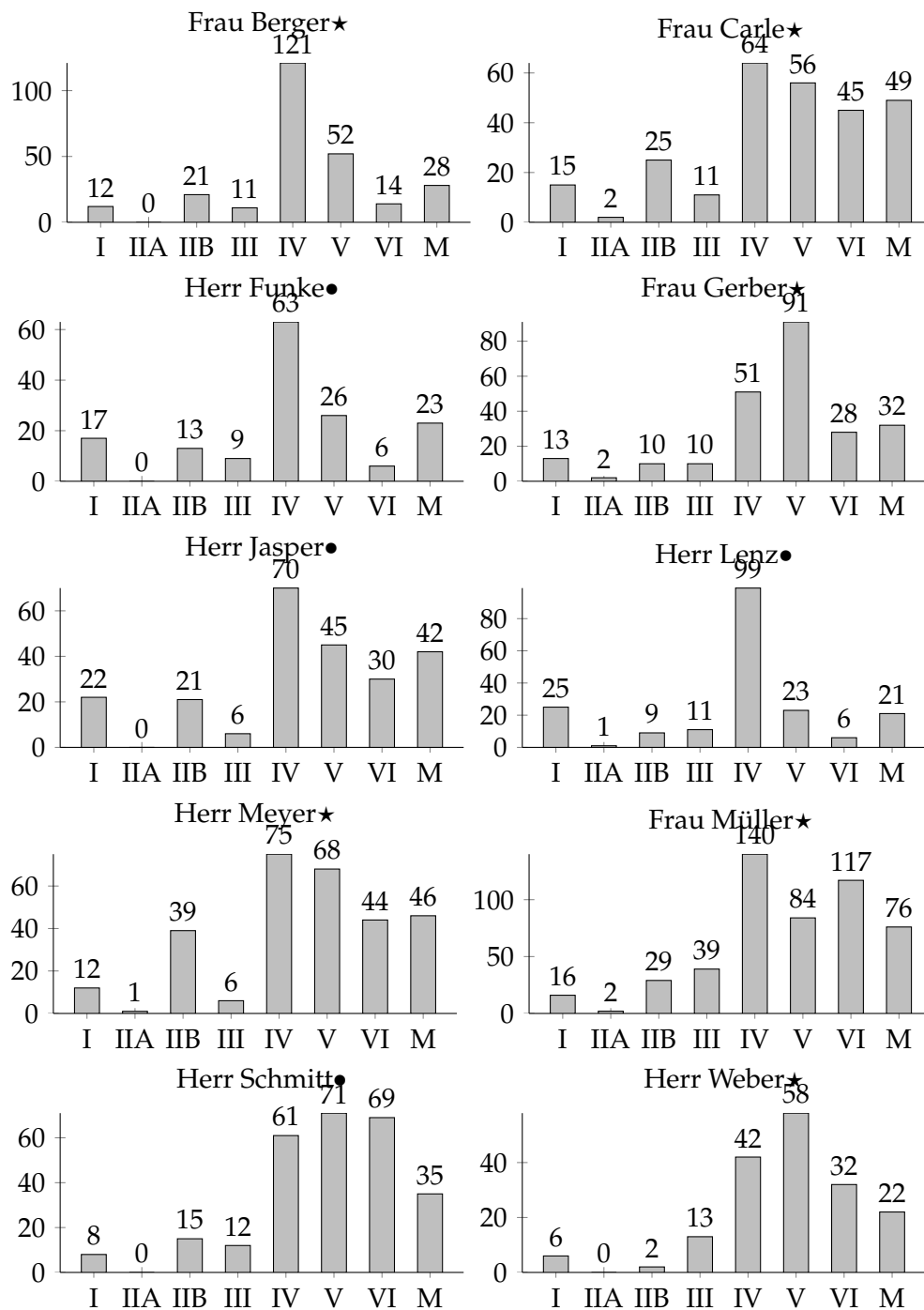


Abbildung D.22.: Codehäufigkeiten der Ebenen für einzelne LehrerInnen

M...Meta-Ebene; •...Gymnasium, ★...Mittelschule

Maximalwerte auf y-Achse auf jeweilige Lehrkraft angepasst

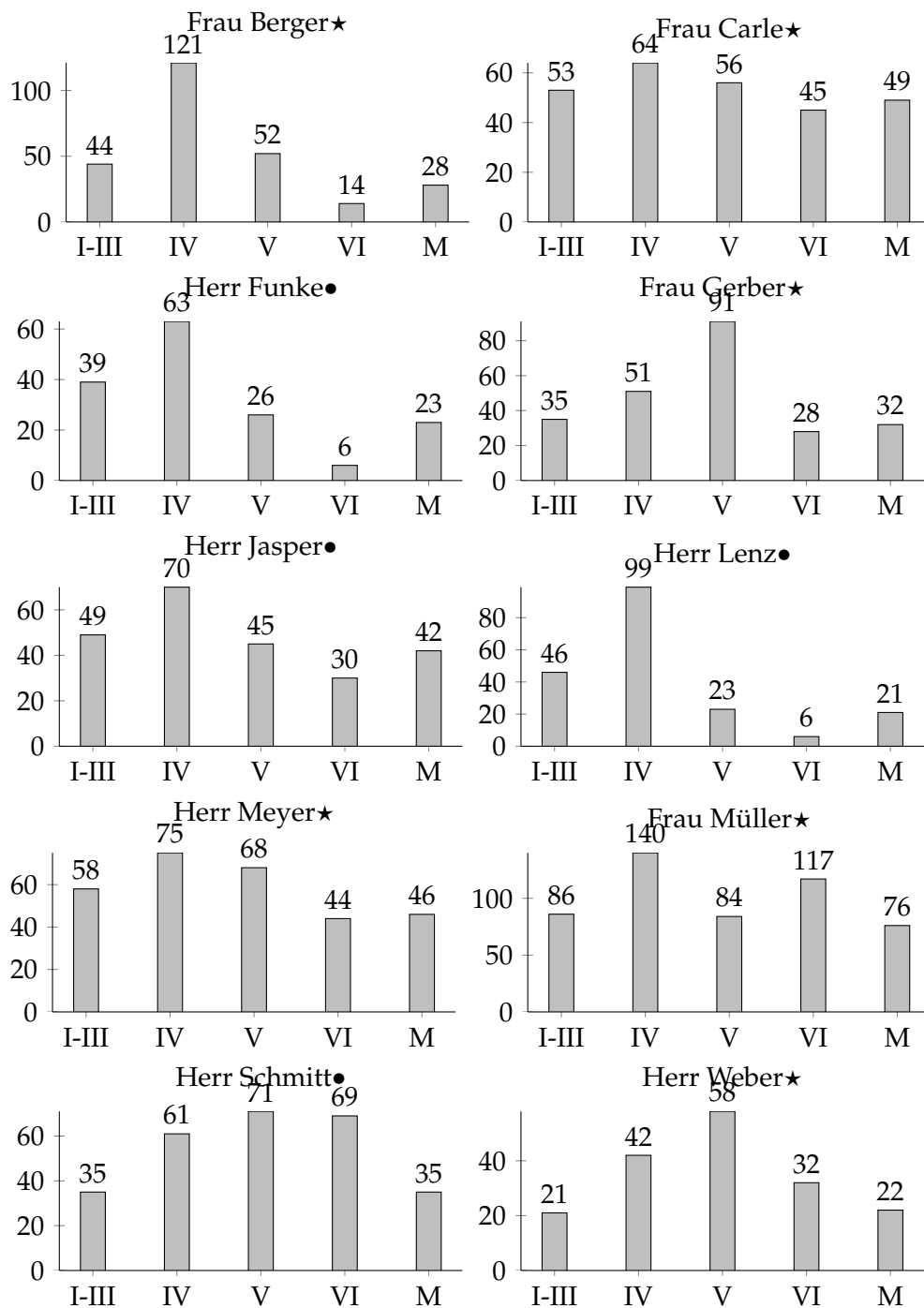


Abbildung D.23.: Codehäufigkeiten der Ebenen für einzelne LehrerInnen, Ebene I, IIA, IIB, III aufsummiert
M...Meta-Ebene; ●...Gymnasium, ★...Mittelschule
Maximalwerte auf y-Achse auf jeweilige Lehrkraft angepasst

D.6. Ausführliche Zitate

D.6.1. Ausführliche Zitate zur Kategorie *Rechnung*

Anwendungsaufgabe

Herr Jasper: „Ein Anwendungsbeispiel für das Widerstandsgesetz. (...) Wie man es regelmäßig in den Nachrichten liest. Irgendwas wurde neu gebaut. Irgendwas wurde fertiggestellt. Und bei der Eröffnung stellt man fest, noch vor Inbetriebnahme der Brandschutzanlage, wie auch immer, strahlt ja, alles frisch gemacht. Unterbett neu. Frisch asphaltiert. Infrastruktur in die Straße reingebaut. Kanalisation. Die läuft Gott sei Dank. Aber Mist. Stromkabel geht nicht. Jetzt hätten die eine Möglichkeit. Die könnten jetzt sagen: wir fangen hier vorne an zu graben und [macht Geräusch von Bohrhammer nach] buddeln flink und wir buddeln uns durch und gucken, wo das Kabel kaputt ist. Da hat natürlich der Straßenbauer was dagegen. Die sagen: Nein, jetzt haben wir das gerade alles frisch geteert. Das muss auch anders gehen. Und wie kann man jetzt mit Hilfe des Widerstandsgesetzes versuchen, die Stelle etwas zu LOKALISIEREN? Dazu folgende Veranschaulichung. Wenn wir uns jetzt mal vorstellen würden, irgendwo ist zwischen diesen beiden Orten ein Kurzschluss entstanden, dann muss in einem der beiden Orte geprüft werden / Kurzschluss heißt ja, dass die Leiter meinetwegen direkt miteinander verbunden sind, weil die Isolierung kaputt gegangen sind. Kurzschluss heißt, ich habe zwischen BEIDEN Drähten eine direkte Verbindung, die in dem Kabel drin sind. Und jetzt schließt man an einer Seite eine Spannungsquelle an und wird über ein Stromstärkemessgerät prüfen, fließt ein Strom: ja? nein? Und wenn man Glück hat, und dieser Kurzschluss entstanden sind in dem Sinne also, dass diese beiden Kabel sich BERÜHREN, die eben beim Kurzschluss kaputt gegangen sind, dann habe ich logischerweise, wenn ich eine Spannung anlege, auch einen Stromfluss. (...) und in dem Moment kann ich die Stromstärke messen und wenn ich weiß, ich hatte eine gewisse Spannung angelegt und ich messe eine dazugehörige Stromstärke in dem Kabel und ich mache das Ganze nicht von Frühjahr bis Herbst oder von Herbst bis Frühjahr sondern nur an EINEM Tag zu EINER ganz bestimmten Zeit, welche Vorraussetzung kann ich (...) als GEGEBEN betrachten, wenn ich Stromstärke und Spannung messe? Elena?"

Elena: (unverständlich)

Herr Jasper: „Genau. Ja, das heißt also, wir können bis hin zum Ohmschen Gesetz alles verwenden. Und in dem Moment weiß ich, wenn ich Stromstärke und Spannung messe, daraus kann ich ganz leicht rechnerisch eine physikalische Größe ermitteln. (...)“

Elena: (unverständlich)

Herr Jasper: „Genau. Ich kann den Widerstandswert R ermitteln. Was ich aus der Baustelle her weiß oder aus den Bauplänen her weiß, ist, was ist es für eine Art von Kabel. Ist es ein Kupferkabel oder ein Aluminiumkabel? (...) Und ich weiß AUCH, wenn das Kabel eingebuddelt worden ist, welche Querschnittsfläche hat das Kabel. Und demzufolge kann ich jetzt aus DEN mir zur Verfügung stehenden Werten ausrechnen, wie lang muss denn nun der stromdurchflossene Leiter sein, damit DIESE Werte herauskommen. Und muss jetzt noch berücksichtigen, dass auch hier wieder der Effekt ist: Bis zur Kurzschlussstelle und wieder zurück ist der stromdurchflossene Leiter. Das heißt also, wenn ich eine bestimmte Länge l heraus bekomme, dann ist das NICHT die Länge zum Kurzschluss, sondern das ist die Länge zum Kurzschluss und wieder zurück. Also muss ich dann logischerweise davon, Leon?“

Leon: „Halbieren.“

Herr Jasper: „Richtig. Die Hälfte nehmen.“(AGB5,135-141)

Herr Jasper: „Man könnte auch, das ist MEIN Weg hier, diese Formel nach U umstellen. Also U ist R mal I . Dann dieses R hier einsetzen und dann ausrechnen. (...) Und wir würden auf eine Spannung kommen, die einem Wert von 29 Volt entspricht. DAS heißt, wenn auf der Baustelle der (Poliervorarbeiter?) wie auch immer, so NAIV wäre und würde sagen, ich nehme eine haushaltsübliche Verlängerungsschnur mit der Länge 650 Metern. (unv.), weil es eben physikalisch keinen Sinn macht, aber rein theoretisch, dann hätte ich ALLEINE nur aufgrund dieses Kabels und dieser Kabellänge einen Spannungsverlust von 29 Volt. Das heißt, wenn ich eine Steckdose für 230 Volt verwende, wo ich den Stecker reinpacke, kommt alleine nur aufgrund der Verluste, aufgrund der INNENwiderstände des Kabels am anderen Ende nur noch eine Spannung von knapp zweihundert Volt an. Was natürlich für die Geräte entsprechend problematisch ist.“(ABG6, 54)

Herr Jasper: „Und wir sollen jetzt ermitteln, welche Spannung liegt am Wi-

derstand an. Unter der Voraussetzung, wir hätten kein zweites Messgerät. (15 s) Haben wir irgendwie eine Chance auf die anliegende Spannung zu kommen? Tina!"

Tina: „(Gleichung umstellen?)“

Herr Jasper: „Okay. Ja das heißt hier noch mal (...) eine Anwendung dieser Gleichung. (...) R ist gleich U durch I , wird nach U umgestellt und die umgestellte Gleichung klappt. (...) Wollen wir mal ganz scharf angucken. Tom!"

Tom: „Vielleicht R mal I ?“

Herr Jasper: „Jawoll.“ (ABG1, 93-97)

Formel umstellen

Herr Meyer: „Also, R ist gleich Rho mal l durch A und jetzt sollten wir einsetzen: Fünfundfünfzig Ohm ist gleich Null Komma Null Eins Sieben, wie heißt die Einheit?“

Antje: „Sieben Quadratmillimeter durch Meter.“

Herr Meyer: „Mal?“

Antje: „Ähm“

Herr Meyer: „Ohm mal Quadratmillimeter durch Meter. Und jetzt steht HIER: Mal l , haben wir keine Zahl, DURCH Querschnitt A , ZWEI Millimeter zum Quadrat. SO muss es stehen. Dann haben wir konsequent eingesetzt. [Flüstern in der Klasse] (16s) Wie muss jetzt gerechnet werden? Erik!

Erik: [keine Antwort]

Herr Meyer: „Das wollen wir raus haben! Du musst schon deutlich sprechen!“

Erik: „ l muss eigentlich hier stehen, also umsetzen?“

Herr Meyer: „UMSTELLEN! Das heißt also, das steht unter dem Bruchstrich, also musst du rechnen?“

Erik: „Mal, äh, durch, äh..“

Herr Meyer: „Da steht durch und wir rechnen, damit es auf die andere Seite kommt?“

Jakob: „MAL!“

Herr Meyer: „MAL zwei Quadratmillimeter. UND das steht OBEN, also MAL steht auf dieser Seite, wie kommt es auf die andere Seite, was musst du rechnen? Erik?“

Erik: „Durch?“

Herr Meyer: „Ja, wenn du das/ wenn DURCH steht, mal rechnest, machst du mit Mal, machst du Durch. Also DURCH null Komma Null Eins Sieben Ohm mal Quadratmillimeter durch Meter, ist gleich l . DAS muss gerechnet werden. So, den anderen Weg haben wir schon mal diskutiert, dass wir ERST umstellen und DANN einsetzen, aber wenn man praktisch rechnet, kommen viele Schüler besser klar.“ (EPR10, 169-175)

Das ohmsche Gesetz umgestellt nach:

Größe	Gleichung	Je, desto - Aussage	Beispielaufgabe
Widerstand	$R = \frac{U}{J}$ J	Je kleiner die Stromstärke bei konstanter Spannung, desto größer ist der Widerstand.	$U = 2V$; $J = 1A$ $R = \frac{U}{J} = \frac{2V}{1A} = 2\Omega$
Spannung	$U = R \cdot J$ R		$R = 10\Omega$, $J = 5A$ $U = 10\Omega \cdot 5A = 50V$
Stromstärke	$J = \frac{U}{R}$		$R = 100\Omega$; $U = 1000V$ $J = \frac{1000V}{100\Omega} = 10A$

Abbildung D.24.: Tafelbild mit dem Umstellen einer Formel (HBG2, TB), Bemerkung: Herr Lenz bezeichnet die Formel $R = \frac{U}{I}$ fälschlicher Weise als Ohmsches Gesetz.

Die Stelle im Unterricht, auf die Herr Meyer verweist, an der die Variante des Umstellens vor dem Einsetzen besprochen wurde, kommt in dieser Stunde nicht vor. Es ist möglich, dass Herr Meyer sich auf eine Stelle zwei Stunden zuvor bezieht, in der folgende Umstellung vorkommt:

Herr Meyer: „Was kommt vorher, du musst ja erstmal eine Gleichung raus-suchen, womit du die Größe berechnen willst. Welche Gleichung hast du genutzt?“

Max: „Äh, U ist gleich I mal R !“

Herr Meyer: „Ja, und wie heißt die Grundgleichung dazu? R ist gleich?“

Max: „Ähm, U durch I ?“

Herr Meyer: „Und das hast du dann umgestellt nach?“

Max: „Nach der Spannung.“

Herr Meyer: „Nach der Spannung U . U ist gleich, ja, I durch R . Eingesetzt, Ausgerechnet! Gut.“

Proportionalität - Werte ermitteln

Frau Müller: „Nächste Zeile. Jetzt müssen wir das anwenden, was wir vorher besprochen haben. Jetzt haben wir einen Kupferdraht von TAUSEND Meter Länge und einem Quadratmillimeter Querschnitt. Was ist mit der Länge passiert? Hier vorne hinschauen beziehungsweise im Kopf nachkramen. Genau. WAS ist mit der Länge passiert? Was muss jetzt mit dem Widerstand PASSIEREN?“

Anne: „Mal tausend.“

Frau Müller: „Ich muss/“

Malte: (unverständlich)

Frau Müller: „Ich meinte nicht dich, ich meinte schon wieder sein Reingequatsche. WAS müssen wir mal tausend rechnen?“

Anne: „Null Komma null eins sieben zwei.“

Frau Müller: „Genau. Begründung? Was ist mit der Länge passiert? Die hat sich?“

Anne: „Verlängert.“

Frau Müller: „Aber das ist zu ungenau.“

Anne: „Um tausend Meter verlängert.“

Frau Müller: „Na, nicht UM tausend Meter [Lachen] Die hat sich verTAUSENDFacht, ok? Genau. WAS muss also mit dem Widerstand passieren?“

Anne: (unverständlich)

Frau Müller: „Was muss der sich? (...) Was muss der sich? (...) Um tausend. Also AUCH um das Tausendfache erhöht werden. Genau, denn Widerstand und Länge sind zueinander proportional. ALSO. Wenn ich jetzt nicht mehr nur EINEN Meter Kupferdraht habe, sondern TAUSEND Meter, wie groß ist denn da jetzt der Widerstand? Philipp?“

Philipp: „17 Komma Zwei.“

Frau Müller: „Genau. Schreiben wir uns hin. 17 Komma Zwei Ohm. So.“
(BTR6, 276-290)

Proportionalität - Werte überprüfen

Frau Carle: „So, wer so weit ist, kann sich ja mal die Punkte anschauen. Und vielleicht fällt euch was auf. (6 s) In dem Bereich stimmt was nicht. Woran das gelegen hat, keine Ahnung. Anna, dir fällt was auf. Ja, sag mal.“

Anna: (unverständlich)

Frau Carle: „Die steigen stetig. Weiter. Und wem fällt noch was auf? Berit?“

Berit: (unverständlich)

Frau Carle: „Ja, das schwankt ein bisschen. Und was noch? (...) Jetzt kommen die Mathematiker unter euch durch hoffentlich. Berit? (...) Wo haben wir denn so ein Bild schonmal ähnlich gehabt? Hm. Mathe. Klasse Sechs.“

Berit: (unverständlich)

Frau Carle: „Ja, wäre aber nicht schlecht, wenn ihr jetzt mal ein bisschen kramt hier oben und mal nachdenkt. Äh, ohne quatschen, Susi. Damit ihr ALLES mitkriegt. Ich warte noch. Mark quatscht auch. Nochmal anschauen. Wie sehen die Werte aus? Bisschen schwankend, sie STEIGEN stetig. (...) Nehmen wir mal an, es sind ein paar Fehler drin. Wie steigt es dann? (...) Gleichmäßig? Wenn ich so die Fehler so ein bisschen/ (unverständlich) Wie sieht das aus? Was haben wir denn kennengelernt in der Mathematik? Die Koordinatensysteme. Wofür haben wir Koordinatensysteme gebraucht in Mathe? Mal sehen, wem es da einfällt. (...) Wo wurde der eine Wert größer und der andere auch? Wie nennt man das in der Mathematik? (...) Häh?“

Jasper: (unverständlich)

Frau Carle: „Ja, real. Ja, das haben wir daraus hergeleitet. Das haben wir daraus hergeleitet. Das ist richtig.“

Jasper: (unverständlich)

Frau Carle: „Nein, hau mal nicht alles in einen Topf rein. Jasper, aber du bist auf dem richtigen Weg. Wenn du mir jetzt noch sagst, was wir da kennen/ was wir da untersucht haben, in der Mathematik, bist du richtig gut heute. Wie nennt man denn so einen Zusammenhang? Wenn die eine Größe größer wird, dann wird auch die andere größer.“

Jasper: (unverständlich)

Frau Carle: „Den haben wir daraus hergeleitet.“

Mona: „(proportional?)“

Frau Carle: „Oh, Mona. Du RETTEST wieder unsere Ehre. Also, wie WAR das mit der Proportionalität? Da wurde die eine Größe?“

Mona: „Größer.“

Frau Carle: „Und die andere auch. Könnt ihr mal (meine Faxen) hier vorne. Wenn die eine Größe steigt, steigt die andere auch. [Gestik] Bei einer indirekten war es genau so. Eine steigt, eine fällt. [Gestik] Das müssen wir uns doch für den Schüler merken. Also so. Und jetzt gucken wir uns das mal an. Haut das hier auch hin? So, legt mal ein Lineal rein. Verbunden mit dem Nullpunkt. Warum verbunden mit dem Nullpunkt? Warum ist das für mich ein Punkt, der markant ist? Leute? Na, was passiert denn bei Null Spannung? Null/ Da passiert gar nichts. Genau so. Das heißt also, wir versuchen/ Anna, noch nicht. Abwarten! Wir DREHEN jetzt unser Lineal durch den Nullpunkt so, dass wir versuchen, dass die meisten Punkte drauf liegen. Wer jetzt sagt: Argh, ist bei mir gar nicht. Der versucht das Lineal SO zu drehen, dass links und rechts von der Linie/ vom Lineal gleich viele Punkte verteilt sind. Machts mal. Ihr müsstet die ersten ignorieren, dann haut es hin, ne? Genau so. Ist ein sehr schönes Ergebnis eigentlich. Ich weiß nicht, was am Anfang war bei euch. So. verbindet mal. Und jetzt ein Lineal reinlegen, Anna. Aber jetzt ein bisschen schneller, sonst kommt ihr nicht mit.“

Anna: (unverständlich)

Frau Carle: „Bei mir sind es vier. Bei Anna sind es halbwegs fünf. So ein bisschen schwankend, so. Ok. Jetzt sind wir einen Schritt weitergekommen, ne? (...) Ja, reicht. Fünf. Super. Bei fünf Werten bin ich schon SEHR zufrieden. Ähm. Wir haben gerade den BEGRIFF genannt. Wer könnte mir denn das jetzt übersetzen. Wer ist denn hier zu wem proportional?“

Anna: „(die Spannung?)“

Frau Carle: „Naja, aber eigentlich andersrum, ne? Die Stromstärke ist ja von der Spannung abhängig, also die Stromstärke ist proportional zur?“

Anna: „Spannung.“

Frau Carle: „Denn? Die Stromstärke WÄCHST mit der Spannung mit, ne? So rum formulieren! Sehr schön habt ihr das jetzt festgestellt! Gucken wir mal. Also mein Diagramm sieht natürlich ein bisschen BESSER aus, weil ich es mir aus dem Internet geklaut habe [Lachen]“ (LRR4, 43-65)

D.6.2. Ausführliche Zitate zur Kategorie **Zusammenhang der Größen untereinander**

je-desto

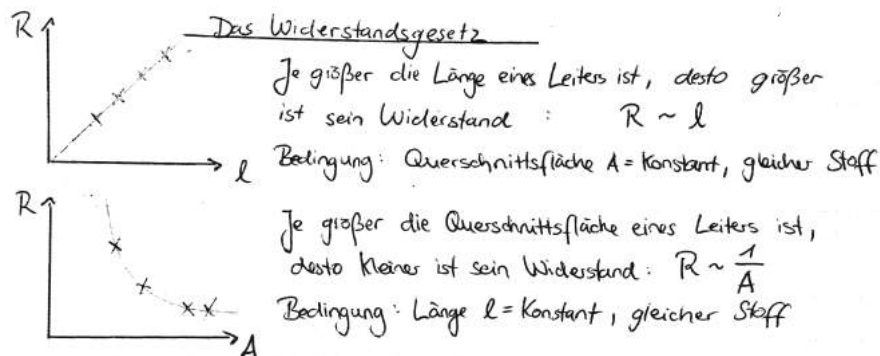


Abbildung D.25.: Ausschnitt eines Tafelbilds zur Auswertung der Experimente zum Widerstandsgesetz (ABG5, TB)

Quotienten-/ Produktgleichheit

Herr Jasper: „WIE ist diese Formel jetzt zu lesen? Beziehungsweise wie ist sie jetzt aus unseren Messwerten entstanden? Gruppe eins hat festgestellt, R ist proportional zu l , also der Länge des Widerstandes, und das bedeutet nichts anderes als das, was wir gerade gesagt haben. Der Quotient R geteilt durch l ist konstant. Und für alle Messwerte, die wir bilden, kriegen wir EINEN identischen Wert raus für den Quotienten. Gruppe zwei hat festgestellt R proportional Eins durch Querschnitt, also die indirekte Proportionalität zwischen Querschnitt und Widerstand. Daraus haben wir geschlussfolgert, rechnerische Überprüfung, R mal A muss ebenfalls (...) konstant sein. (...) Bis hierhin nichts Neues. (5 s) Wenn ich WEISZ, dass R geteilt durch l konstant ist und wenn ich auch weiterhin weiß, dass R multipliziert mit A konstant ist und ich die beiden Größen jetzt zusammenführen würde. (7 s) Ich bilde den Quotienten aus R mal A (...) und dividiere das Ganze durch l . (...) Sind alles Messwerte, die ich so fast habe. Das Gesuchte dann jeweils ausgerechnet. Wir haben den Querschnitt, wir haben die Länge. Wir führen jetzt praktisch der ersten beiden Gruppen zusammen.“ (ABG5, 90)

D.6.3. Ausführliche Zitate zur Kategorie *Anwendung oder Experiment*

Frau Berger: „Gibt es auch ein Beispiel wo der/ die Querschnittsfläche eine Rolle spielt?“

Max: „Nein.“

Frau Berger: „Doch. Bei euch zu Hause.“

Max: „Echt? Ich dachte/“

Frau Berger: „Echt! Bei euch zu Hause. (...) Wer hat zu Hause/ Oder bei wem zu Hause steht ein Elektroherd?“

Mona: (unv.)

Frau Berger: „Echt? Und hast du mal/“

Mona: (unv.)

Frau Berger: „Nicht gut. Der wird vom Elektriker eingebaut. Das hat auch seinen Grund. (...) Was meinst du? Ist deine Zuführung zu dem Elektroherd, ist das genau so ein dünnes Kabel wie das jetzt hier?“

Mona: (unv.)

Frau Berger: „Nein. Nein man sieht es nicht, aber das (unv.).“

Mona: (unv.)

Frau Berger: „Gut. Halt. (9 s) Also je nach Funktion haben die elektrischen Leiter unterschiedliche Querschnittsfläche. Könnt ihr euch noch an den Löwenzahn erinnern? Der hat auch/ An den Film, wo die Elektronen im größeren Querschnitt UNGEHINDERTER durchlaufen konnten und wir dann zum Beispiel auch bei den Fernleitungen gesagt hat/ Die haben also auch einen größeren Querschnitt. Gut. Wir/ Wie formulieren wir das? (...) Querschnitt wird/ (...) Ja die Querschnittsfläche wird angepasst an/“ (...)

S: (unv.)

Frau Berger: „Ja oder an die nu/ an die Nutzung der Geräte.“ (AWR5, 167-181)

D.6.4. Ausführliche Zitate zur Kategorie *Analogie*

Frau Gerber: „Je dicker der Draht ist, also je größer die Querschnittsfläche wird, (...) stellt euch mal vor, wir haben (Rohre?), kennt ihr, oder? (...) Und wir haben jetzt ein Rohr, dessen Querschnittsfläche relativ groß ist, wir

haben beispielsweise einen Durchmesser vom Rohr zwei Meter. Könnt ihr euch das vorstellen? Schon größer oder? So, jetzt wollen wir durch dieses Rohr hindurch. Wir alle. (...) Können wir da so durch laufen? Oder müssen wir (unv.). Bei zwei Meter? Zwei Meter Durchmesser.“

Tom: „Können wir durchlaufen“

Frau Gerber: „Da können wir durchlaufen. Können wir gut hindurch laufen? (6 s) Wir alle? Zwei Meter Durchmesser, also (unv.) zum Veranschaulichen. (...) Nein ist klar, (...) zwei Meter. (...) Durch solch ein Rohr wollen wir durch. Wir sind jetzt gerade mal so meine Größe, ich habe eins sechzig. (...) Was?“

Philipp: (unv.)

Frau Gerber: „Und Nico ist ein bisschen größer. Wie groß bist du?“

Nico: „Ein Meter (achtzig?)“

Frau Gerber: „OK. Gut, könnte neben mir laufen, kommt noch durch, muss sich noch nicht den Kopf stoßen. Jetzt stellt euch mal vor, wir würden dieses Rohr (...) verkleinern. Also wir würden ein Rohr nehmen, wo wir vielleicht bloß noch einen Meter haben. (4 s) Und wollen da auch durch. (..) Müssen wir ganz schön kriechen. Richtig erkannt. Das heißt also, beim ersten Fall, zwei Meter, kommen wir ganz gut durch. Beim zweiten Rohr mit dem Durchmesser und damit verändert sich ja immer die Querschnittsfläche, je größer der Durchmesser, je größer ist der Querschnitt. Je kleiner der Durchmesser, je kleiner ist der Querschnitt. Also, wo können wir besser hindurch? Großes Rohr oder kleines Rohr?“

mehrere SchülerInnen: „Großes“

Frau Gerber: „Richtig, großes Rohr.“ (KTH5, 37-45)

D.6.5. Ausführliche Zitate zur Kategorie *Metareflexion über Sprache*

Zitat zur Bedeutung von Ohm:

Herr Schmitt: „Es ist / das ZEICHEN heißt Omega, dieser griechische Buchstabe. Ist aber die Abkürzung für Ohm und Ohm ist der Name eines deutschen Physikers gewesen. Okay? Wie bitte?“

Tim: „Das ist Herr Onkel. Ohm heißt Onkel.“

Herr Schmitt: „Wo?“

Max: „In Altdeutsch.“

Herr Schmitt: „Altdeutsch? Woher wisst ihr denn sowas?“

einige SchülerInnen: „Youtube, Google.“

Herr Schmitt: „Ah, stimmt. Ja, dann. Es kann natürlich sein, dass der Name OHM irgendwann mal von Onkel gekommen ist, das ist halt / ja / also durchaus möglich.“ (SSG3, 45-51)

Zitat zur Bedeutung von spezifisch:

Frau Carle: „Rho. Und wie/ wie heißt das Ding? Rho ist ja bloß ein Formelzeichen. Wofür?“

Anna: „R ist gleich Rho mal l.“

Frau Carle: „WOFÜR ist RHO das FORMELZEICHEN? (...)“

Anna: „Ach, hier!“

Frau Carle: „Marko.“

Marko: „Die Dichte.“

Frau Carle: „Auch. Aber nicht in dem Zusammenhang. Leute, wir haben es doch letzte Stunde aufgeschrieben. Wenn ihr euren Hefter schon auf habt, schön, dass du sortierst, hier vorne. Einwandfrei, Timo. Wenn ich sehe, wie der Hefter aussieht, wird mir SCHLECHT. Das ist SCHLAMPIG, was du da hast. Merle.“

Merle: „Spezifischer elektrischer Widerstand.“

Frau Carle: „Genau so. Das heißt, was heißt denn spezifisch? Übersetz mal das Wort. Was heißt spezifisch? Was heißt spezifisch?“

Bernd: „Auf eine Sache/“

Frau Carle: „Bezogen. Genau. Also auf eine Sache bezogen. Das heißt also, man hat/ ich hatte euch ja erklärt, man hat von JEDEM Material, wo es GEHT natürlich, logisch, Leiter hergestellt. Ein Meter Länge. Und was für ein Querschnitt? Was für eine Querschnittsfläche?“

Bernd: „Ähm, ein Quadrat/“

Frau Carle: „Ein Quadratmillimeter. Und hat DANN ausgemessen, wie groß der Widerstand ist. Wie man DAS dann machen kann, wissen wir. R ist gleich U durch I . Damit kann man das auch machen. Und hat festgestellt,

also für jeden Stoff immer wieder und immer wieder probiert, es kommt immer der selbe Wert raus. So und das ist der SPEZIFISCHE ELEKTRISCHE WIDERSTAND. Und der gibt uns Auskunft über die Leitfähigkeit eines Metalls zum Beispiel. Und die brauchen wir jetzt im WIDERSTANDSGESETZ.“ (LRR11, 27-39)

D.6.6. Ausführliche Zitate zur Kategorie *Erkenntnistheoretische Klassifizierung von Formeln*

Frau Müller: „Also wir haben jetzt rausgekriegt, wie groß der Widerstand dieses eintausend Meter langen Kupferdrahtes ist mit einem Querschnitt von zwei Quadratmillimetern. Über DREI Schritte. Erster Schritt: Wir suchen uns den spezifischen Widerstand raus. Zweiter Schritt: Wir gucken, was mit der Länge passiert ist. Dritter Schritt: Wir gucken, was mit dem Querschnitt passiert ist. Und DAS kann man jetzt in eine Formel packen. Der elektrische Widerstand eines Leiters. DER kann also berechnet werden. Wir haben ihn gerade berechnet. Überlegt noch mal, was wir gemacht haben. Als erstes haben wir was gesucht, Jule?“

Jule: (unverständlich)

Frau Müller: „Du brauchst einfach nur in deinen/ deine jetzigen Aufzeichnungen von dem/ genau. Was haben wir zuerst geguckt?“

Jule: (unverständlich)

Frau Müller: „Nein haben wir nicht. Stimmt nicht. WAS haben wir zuerst geguckt?“ (...)

Jule: „Wie viel der (spezifische Widerstand ist)“

Frau Müller: „Genau. Wir haben zuerst geguckt, wie groß der spezifische Widerstand des Kupferdrahtes ist. Also des Kupfers. WAS haben wir dann damit gemacht? Also zweiter Schritt?“

Jule: „(mal tausend)“

Frau Müller: „Und jetzt allgemein, wenn jetzt der Draht nur fünfzig Meter lang gewesen wäre? Was hätten wir dann machen müssen, Antje?“

Antje: „(mal fünfzig)“

Frau Müller: „Also? Jetzt verallgemeinern wir noch weiter. WAS machen wir mit dem spezifischen Widerstand? (...) Ja, das ist/ das reicht mir nicht. (...) Wenn wir ihn vertausendfachen? Was rechnen wir denn dann? Mal

tausend. Wenn wir ihn verfunfzigfachen? Und jetzt allgemein. Wenn die Länge beliebig ist, was müssen wir dann mit dem spezifischen Widerstand machen? (...) “

Antje: (unverständlich)

Frau Müller: „Mit? Pscht. Welche anderen Zahlen? Was denn für eine andere Zahl?“

Antje: „Keine Ahnung.“

Frau Müller: „Nein. Sag nicht immer keine Ahnung! Wo kommt die andere Zahl her? was ist das für eine Größe, mit der wir diesen spezifischen Widerstand multiplizieren? (...)“

Antje: „Mit der Länge.“

Frau Müller: „Mit der Länge. Genau. Wir haben den jetzt mit der Länge multipliziert. Entweder mit tausend oder je nachdem, was es ist. Genau. Und dann haben wir noch einen dritten Schritt gemacht. (...) Jetzt kam noch der Querschnitt ins Spiel. (...)“

Antje: (unverständlich)

Frau Müller: „M-m [verneinendes Geräusch] Was haben wir im dritten Schritt gemacht? Als wir festgestellt haben, dass der Querschnitt jetzt zwei Quadratmillimeter ist?“

Antje: „Halbiert.“

Frau Müller: „Halbiert. Jetzt können wir aber nicht sagen, grundsätzlich, wir halbieren. Weil, wenn der der Querschnitt jetzt plötzlich fünf Quadratmillimeter ist, dann können wir ja nicht halbieren. Sondern WAS müssen wir jetzt machen? Der Querschnitt hat sich verdoppelt, wir haben halbiert. Wenn der Querschnitt sich verFÜNffacht hätte, was hätten wir dann machen müssen?“

Antje: (unverständlich)

Frau Müller: „Durch Fünf rechnen. Und jetzt allgemein. WAS müssen wir also mit unserem Produkt machen?“

Antje: (unverständlich)

Frau Müller: „Durch den Querschnitt rechnen. Genau. Jetzt müssen wir noch durch den Querschnitt dividieren. Perfekt. Und JETZT haben wir unsere Formel.“ (BTR6, 300-324)

D.6.7. Ausführliche Zitate zur Wiederholung von Proportionalitäten aus dem Matheunterricht

Frau Berger: „[...] und jetzt kommt (...) die MATHEMATIK ins Spiel. (...) [gespieltes tiefes Luftholen] Da muss man nicht gleich tief Luftholen. [Lachen] Ihr denkt mal bitte an Mathematik der sechsten Klasse. (...) Wenn ich zwei Zahlenfolgen hab, die beide größer werden, (...) welche VERMUTUNG könnte dann aufgestellt werden? (...) Das weiß nicht nur einer (...) Los!“ [...]

Thorsten: „Die Proportionalität.“

Frau Berger: „Sehr schön! Welche Proportionalität? Nora. Welche direkt? (unv.) Gut okay. [...] Eine Zahlenfolge wird größer, die andere wird kleiner. Welche VERMUTUNG könnte ich aufstellen?“

Nora: (unv.)

Frau Berger: „Jawoll. Indirekte oder umgekehrte/ Max, was habe ich dir gesagt?“

Max: „Indirekte.“

Frau Berger: „Indirekte. Gut. (...) So. (...) Ich könnte aber jetzt die VERMUTUNG aufstellen / Wie kann ich denn das nachweisen, ob das stimmt? (...) Und da nehmt ihr das Tafelwerk. Sucht bitte die entsprechenden Seiten im Tafelwerk. [...] Okay. Wie könnte ich nachweisen, dass es sich um DIREKTE PROPORTIONALITÄT handelt? Ihr habt jetzt das Tafelwerk vor euch liegen. (...) Die beiden Möglichkeiten des Nachweises sind im Tafelwerk genannt. Martin.“

Martin: (unv.)

Frau Berger: „Nein. Das ist falsch. (...) Du hast gesagt: Die Spannung ist genauso groß wie die Stromstärke. Und das ist falsch. (...) Diese Formulierung ist falsch. (...) Christian.“

Christian: „Wenn sich der eine Wert ändert, dann ändert sich der gleich im selben (...) Wert/ also (...)“

Frau Berger: „Im selben/ (...) Nicht Wert, sondern?“

Christian: (unv.)

Frau Berger: „Was? Selben Verhältnis? Hast aber recht. Das ist aber jetzt schwierig. Wenn ich Messwerte habe, meint ihr, dass die Spannung wirk-

lich zwei, vier, sechs, acht Volt so beträgt? Von euren bisherigen Messungen? Haben wir das so rausgekriegt? (...) Nein. (...) Also muss ich ja irgendwie eine andere Möglichkeit finden. [...] Wie wird dort die direkte Proportionalität erklärt? (...) Anna, lies bitte alles vor, was bei direkter Proportionalität da steht.“

Anna: „A ist proportional zu B.“

Frau Berger: „Ja.“

Anna: „Wenn proportionale Eigenschaften (quotientgleich k?) proportional / proportionali / Proportionalitätskonstante.“

Frau Berger: „Okay. Dürfen/ Dürfen sie markieren. (...) Welches Wort war jetzt ganz wichtig, damit ich nachprüfen kann, ob meine beiden Messreihen direkt proportional zueinander sind? (...) Lisa.“

Lisa: „Quotientengleich?“

Frau Berger: „Jawoll. Quotientengleichheit. [...] Was bedeutet das für diesen beiden Größen Spannung und Stromstärke, wenn es heißt Quotientengleichheit. [Anschreiben] Was steht daneben bei den Formeln? [...]“

Neele: „Meinen Sie jetzt: A eins ist gleich A zwei/ Also A eins durch B eins ist gleich A zwei durch B zwei.“

Frau Berger: „Das meine ich. Also immer wenn ich die Quotienten bilde von der Messreihe, muss der Wert konstant bleiben. Was wäre jetzt hier der Quotient? (...) Ich möchte gern den Zusammenhang zwischen U und I bestimmen. Welchen Quotient müsste ich dann berechnen, bei der Messreihe / bei den Messreihen? (...) Das ist aber heute zäh bei euch. (...)“

Neele: (unv.)

Frau Berger: „I ist eine Größe. (...) Einen Quotienten/ Was ist den ein Quotient? (...)“

Neele: „Das ist die Summe/“

Frau Berger: „argh! [lautes Empören]“

Neele: „Das ist das Ergebnis in der Division.“

Frau Berger: „Jawoll. Also Division. Ich hab vergessen, dass ich das Ding umhängen habe. (...) Also/ Und jetzt bilde bitte mal den Quotienten.“

Neele: „U durch I.“

Frau Berger: „Sehr schön! Und was/ Egal welches Messwertpaar ich nehme, was muss immer rauskommen? (...) QUOTIENTENGLEICHHEIT! (8 s)“

Neele: „Ich würde sagen U durch I muss auch I durch U sein.“

Frau Berger: „Nein. Das ist falsch. Ja. Stopp. Stimmt schon, aber (...) wenn ich I durch U nehme / das / so ist es falsch, wie du gesagt hast. Das ist falsch. Das geht nicht. Aber ich kann auch I durch U rechnen, aber das ist in der Physik/ gewöhnt euch das garnicht erst an. Wir machen U durch I . [...] Dann nochmal: U -eins durch I -eins müsste dasselbe sein wie?“

Anna: (unv.)

Frau Berger: „Wie U -zwei durch I -zwei (...) und das müsste wieder das Gleiche sein wie?“

Anna: „ U -drei durch I -drei.“

Frau Berger: „Und wie sagt man das ganz allgemein? (...) In der Physik (...) sagt man dazu U durch I ist gleich für alle Messwertpaare konstant. Konstant bedeutet: Es ändert sich nicht. (...) Okay. Jetzt gibt es noch eine Möglichkeit, das nachzuweisen die / die direkte Proportionalität. Schaut bitte in euer Tafelwerk. Was gibt es noch? (...) Was ist dort noch abgebildet? (...) Tim. [...]“

Tim: „A-eins mal B-zwei.“

Frau Berger: „Stopp. Stopp. Stopp. Das ist indirekte Proportionalität. Wir sind noch bei der direkten Proportionalität. Was ist bei der direkten Proportionalität im Tafelwerk noch abgebildet? Tim. [...]“

Tim: „A-eins mal (unv.)“

Frau Berger: „Gut. Wie viel Spalten/ Wie viele Spalten haben wir in der Tabelle?“

Tim: „Drei.“

Frau Berger: „Drei. Genau. Was ist in der dritten Spalte bei der direkten Proportionalität abgebildet? (...) Ein Diagramm. (7 s) So. Ein Diagramm. Was, wenn ich die Messwerte in das / in ein Diagramm zeichne. Was entsteht bei direkter Proportionalität immer?“

Tim: „Eventuell ein proportionaler Graph?“

Frau Berger: „Graph ist nicht direkt proportional. Ein Graph weist darauf hin, Tim. Wie sieht der / Beschreibe einfach, was du siehst im Tafelwerk.“

Tim: „Einen Strich.“

Frau Berger: „Einen Strich? Ist der Strich gerade? Ist der Strich kurvig?“

Tim: „Der ist gerade.“

Frau Berger: „Der ist GERADE. Okay. Wo / Wodurch verläuft dieser Strich?“

Kai: „Durch den Nullpunkt.“

Tim: „Durch Null.“

Frau Berger: „Also eine gerade Linie durch den Nullpunkt. So. Wo habt ihr in der Mathematik das x angetragen, wo das y?“

Tim: „Rechts das x und oben das y.“

Frau Berger: „Okay. Und y habt ihr gelernt, ist abhängig von dem x. So, wir stellen jetzt / Wir verändern die Spannung und wollen nachschauen, wie sich die Stromstärke ändert. Also müsste man das bei uns so machen. Okay. Das war jetzt ne schwere Geburt Leute. (...) Gut.“ (AWR2, 48-111)

D.7. Vorkommen der Unterkategorien bei einzelnen LehrerInnen und Formeln

Kategorie	Lehrer	Jasper	Lenz	Funk	Schnitt	Berger	Müller	Meyer	Weber	Gerber	Carle	RUI	WG	OG	Σ
Rechnung															
ohne Kontext		X00	XX0	XX0	XX0	X00	XX0	XX0	0X0	X00	XX0	9	8	0	10
exp. Werte		X00	X00	X00	X00	X00	X00	XX0	X00	X00	X00	10	1	0	10
Anwendung		XX0	XX0	000	XX0	X00	X00	XX0	X00	X00	XX0	9	5	0	9
Formel umstellen		XX0	XX0	0X0	XX0	X00	X00	XX0	000	000	0X0	6	6	0	8
Prop.: Werte ermitteln		0X0	000	0X0	000	0X0	0XX	00X	0X0	00X	000	0	5	3	7
Prop.: Werte überprüfen		000	000	000	0X0	0XX	0XX	000	0X0	00X	0XX	0	5	4	6
Zshg. zw. Größen															
Spezial-/Grenzfälle		000	000	000	XX0	00X	0X0	000	0X0	000	00X	1	3	2	5
Proportionalität		XX0	XX0	0X0	0X0	XX0	0X0	0X0	0X0	000	000	3	8	0	8
Veränd. in gl. Richtung		XXX	XXX	X00	XX0	XXX	XX0	XX0	XXX	XX0	XXX	10	9	5	10
Veränd. in gl. Maß		0X0	0X0	000	0X0	0XX	00X	X0X	000	00X	0XX	1	5	5	8
Verdoppelung...		XXX	000	0X0	0X0	XXX	0XX	XXX	0X0	00X	0X0	3	8	5	9
je-desto		0X0	XXX	0X0	0X0	XXX	0X0	XX0	0X0	0XX	XXX	4	10	4	10
Quot.-/Prod.gl.h.		0X0	000	000	000	00X	00X	00X	00X	000	00X	0	1	5	6
abhg. von		0X0	XX0	0X0	0XX	XXX	XXX	XXX	0XX	XXX	0XX	5	10	7	10

Tabelle D.11.: Vorkommen der Unterkategorien bei LehrerInnen und Formeln

X...Kategorie taucht auf, 0...Kategorie taucht nicht auf

das erste Zeichen steht jeweils für die Definitionsformel, das zweite für das Widerstandsgesetz, das dritte für das Ohmsche Gesetz

Kategorie	Lehrer	Jasper	Lenz	Funke	Schmitt	Berger	Müller	Meyer	Weber	Gerber	Carle	RUI	WG	OG	Σ
Klassifizierung															
Formel zur Berechnung	XX0	XX0	XX0	XX0	XX0	XX0	XX0	XX0	XX0	X00	X00	XX0	10	8	0 10
Kurzform	000	X00	0X0	00X	X0X	X0X	XXX	XX0	00X	X00	XXX	7	6	5	9
Definition	X00	000	000	000	X00	X00	X00	X00	X00	X00	X00	7	0	0	7
formal ggb.	X00	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	1	0	0	1
emp. Gesetz	0XX	0X0	0X0	0XX	XXX	0X0	0X0	00X	00X	00X	0XX	1	7	7	10
Verallgemeinerung	000	000	000	000	000	0XX	000	000	000	000	000	0	1	1	1

Tabelle D.12.: Vorkommen der Unterkategorien bei LehrerInnen und Formeln

X...Kategorie taucht auf, 0...Kategorie taucht nicht auf
das erste Zeichen steht jeweils für die Definitionsformel, das zweite für das Widerstandsgesetz, das dritte für das Ohmsche Gesetz

Abbildungsverzeichnis

1.1.	Aufbau der Arbeit	8
2.1.	Wissenschaften sind unterschiedlich, hier dargestellt in einem Comic von xkcd.com (Munroe, 2008)	11
2.2.	Physik und Mathematik dargestellt im <i>discipline-culture-model</i> nach Galili (2018, S. 22-23)	15
3.1.	Mathematische Darstellungsformen im Physikunterricht	24
3.2.	Ansätze zur Beschreibung einer technischen oder inhaltlichen Vermittlung von Mathematik	27
3.3.	Wirken diese laut sächsischem Lehrplan für das Gymnasium geforderten Formeln (vgl. SMK, 2011) auf SchülerInnen abschreckend?	33
3.4.	Verdichtete Semantik einer Formel	35
3.5.	Ausschnitt eines semantischen Netzwerkes für die Formel $s = \frac{1}{2}a \cdot t^2$	38
3.6.	Gruppen bezüglich der Einstellung zur Rolle der Mathematik in der Physik und zu Vermittlungs- sowie Problemlösestrategien	45
3.7.	Ergebnisse unterschiedlicher Studien zur Frage, was für SchülerInnen zum Formelverständnis gehört	59
4.1.	Kommunikation als Prozess der Bedeutungsaushandlung	65
4.2.	Semiotisches Dreieck oder Zeichentriade nach Peirce (1931–1935)	68
4.3.	Zwei Seiten eines Zeichens nach de Saussure	69
4.4.	Sprachebenen im Physikunterricht nach Wagenschein (1988) und Muckenfuß (1995)	74
4.5.	Konstruktivistisches Modell physikalischer Kommunikation, leicht adaptierte Darstellung nach Kulgemeyer (2010) und Kulgemeyer und Schecker (2012)	84
5.1.	Klassifikation von Darstellungen nach Bruner, Darstellung adaptiert aus Geyer und Kuske-Janßen (2019, S. 76)	92

5.2.	Klassifikation von Darstellungen im Physikunterricht, adaptiert aus Geyer und Kuske-Janßen (2019, S. 81), übersetzt von Geyer und Kuske-Janßen	94
5.3.	Ebenenmodell der Versprachlichung von Formeln als Ableitung aus der Sprachwissenschaft	97
5.4.	Angepasstes Ebenenmodell der Versprachlichung von Formeln nach Lehrbuchanalysen	100
5.5.	Beispiel Ebenenmodell der Versprachlichung von Formeln nach der Ergänzung der Ebene IIA	100
5.6.	Finales Ebenenmodell der Versprachlichung von Formeln	102
5.7.	Ausprägung der Dimensionen Abstraktheit, Mathematisierung und Sprache in den Ebenen IV, V und VI	105
9.1.	Ablaufschema der angepassten inhaltlich strukturierenden Inhaltsanalyse, adaptiert nach Kuckartz (2016, S. 100)	133
10.1.	Beschreibung der Stichprobe: Geschlecht und Erfahrungsjahre . . .	138
12.1.	Anteile der Formeln und der Oberkategorien an den Gesamtcodings (N=2491)	144
12.2.	Kategoriensystem	146
12.3.	Kategorien der Oberkategorie „Formel wird gesprochen“	147
12.4.	Codehäufigkeiten Kategorien zu <i>Formel wird gesprochen</i> I...Formel, IIA...Wortformel, IIB...Formelsatz mit FZ, III...Formelsatz mit Termini	148
12.5.	Codehäufigkeiten Unterkategorien zu <i>Formel</i>	149
12.6.	Codehäufigkeiten Unterkategorien zu <i>Formelsatz mit Formelzeichen</i>	152
12.7.	Codehäufigkeiten Unterkategorien zu <i>Formelsatz mit Termini</i>	156
12.8.	Kategorien der Oberkategorie <i>Formel wird angewendet oder interpretiert</i>	161
12.9.	Codehäufigkeiten Kategorien zu <i>Formel wird angewendet</i>	163
12.10.	Codehäufigkeiten Unterkategorien zu <i>Rechnung</i>	164
12.11.	Abschrift eines Tafelbilds mit Rechnung zum Widerstandsgesetz (SBG6, TB)	165
12.12.	Abschrift eines Tafelbildausschnittes mit Rechnung zum Widerstand im Rahmen eines Schülerexperimentes (EPR3, TB)	169
12.13.	Abschrift eines Tafelbilds mit dem Umstellen des Widerstandsgesetzes mit eingesetzten Werten (EPR10, TB)	171
12.14.	Abschrift eines Tafelbilds mit Herleitung des Widerstandsgesetzes (SSG8, TB)	177

12.15. Codehäufigkeiten zu <i>Zusammenhang zwischen Größen</i>	182
12.16. Codehäufigkeiten Unterkategorien zu <i>Veränderung in gleiche / unterschiedliche Richtung</i> ; US...Unterrichtssprache, FS...Fachsprache . . .	183
12.17. Ausschnitt der Abschrift eines Tafelbilds zur Diskussion des Verhaltens der Größen des Widerstandsgesetzes (BTR6, TB)	184
12.18. Codehäufigkeiten Unterkategorien zu <i>Proportionalität</i>	189
12.19. Codehäufigkeiten Unterkategorien zu <i>Anwendung oder Experiment</i> .	194
12.20. Codehäufigkeiten verschiedener Termini zu <i>Beschreibung einzelner Größen</i> ; G-F-E...Größe-Formelzeichen-Einheit	199
12.21. Wortwolke zu den codierten Textstellen für die Beschreibung des Widerstandes	201
12.22. Wortwolke zu den codierten Textstellen für die Beschreibung der elektrischen Spannung	202
12.23. Abschrift eines Tafelbilds mit der Einführung des Widerstandes mit zugehörigem Formelzeichen und zugehöriger Einheit (KPR4, TB) .	203
12.24. Abschrift Tafelbild zum Modell Elektronenleitung (AWR4, TB) . . .	204
12.25. Codehäufigkeiten Unterkategorien zu <i>Analogie</i>	206
12.26. Kategorien der Oberkategorie <i>Über Formel wird gesprochen</i>	209
12.27. Codehäufigkeiten Unterkategorien zu <i>Über Formel wird gesprochen</i> .	211
12.28. Anteile Codings mit entsprechenden inhaltlichen Ausprägungen an der Kategorie <i>Wichtigkeit oder Vorteile einer Formel</i> ($N_{ges} = 49$) . .	214
12.29. Ausschnitt der Abschrift eines Tafelbilds zum Ohmschen Gesetz (EPR4, TB)	220
12.30. Codehäufigkeiten Unterkategorien <i>Klassifizierung der Formel</i>	224
12.31. Ausschnitt aus der Abschrift eines Tafelbilds zum Elektrischen Widerstand (LRR5, TB)	225
12.32. Darstellung der Anzahl der LehrerInnen, die für einzelne Formeln die jeweilige Klassifizierung beschreiben	231
12.33. Pyramide als Hilfestellung für das Umstellen der Formel $R = \frac{U}{I}$. .	237
12.34. Ausschnitt aus der Abschrift eines Tafelbilds zur doppelten Bedeutung des Begriffes Widerstand (KPR10, TB)	240
13.1. Zuordnung des Ebenenmodells zu den Oberkategorien des Kategoriensystems	244
13.2. Zuordnung der Kategorien zu den Ebenen des Ebenenmodells . . .	247
13.3. Codehäufigkeiten der Ebenen des Ebenenmodells	248

14.1. Verteilung der Codings auf die Ebenen für die Definitionsformel ($N = 1337$), das Ohmsche Gesetz ($N = 316$) und das Widerstandsgesetz ($N = 837$)	264
15.1. Verteilung der unterschiedlichen Rechnungsarten in gesamter Stichprobe	275
15.2. Tafelbild zur Einführung des elektrischen Widerstandes (KTH2, TB)	278
15.3. Tafelbild mit Rechnung zum Widerstandsgesetz (LRR10, TB)	279
16.1. Zuordnung der Kategorien zu den Ebenen des Ebenenmodells . . .	294
D.1. Transkribierte Unterrichtszeit der einzelnen LehrerInnen	335
D.2. Absolute Anzahl der Codings für einzelne LehrerInnen	335
D.3. Codehäufigkeiten zu <i>Formel wird gesprochen</i> für einzelne LehrerInnen	336
D.4. Codehäufigkeiten der Unterkategorien von <i>Formel wird gesprochen</i> für einzelne LehrerInnen	337
D.5. Codehäufigkeiten zu <i>Formel wird angewendet oder interpretiert</i> für einzelne LehrerInnen	338
D.6. Codehäufigkeiten der Unterkategorien von <i>Formel wird angewendet oder interpretiert</i> für einzelne LehrerInnen	339
D.7. Codehäufigkeiten zu <i>Rechnung</i> für einzelne LehrerInnen	340
D.8. Codehäufigkeiten der Unterkategorien von <i>Rechnung</i> für einzelne LehrerInnen	341
D.9. Codehäufigkeiten von <i>Rechnung - Proportionalität: Werte ermitteln</i> . .	342
D.10. Codehäufigkeiten von <i>Rechnung - Proportionalität: Werte überprüfen</i> .	342
D.11. Codehäufigkeiten der Unterkategorien von <i>Anwendung oder Experiment</i> für einzelne LehrerInnen g...genannt, e...erklärt	343
D.12. Codehäufigkeiten verschiedener Ausprägungen von <i>Anwendung oder Experiment: genannt</i> und <i>Anwendung oder Experiment: erklärt</i> . .	344
D.13. Codehäufigkeiten Modell bei einzelnen LehrerInnen *... lassen Stromfluss als Analogiespiel nachspielen	345
D.14. Codehäufigkeiten Beschreibung einzelner Größen	346
D.15. Codehäufigkeiten Beschreibung einzelner Größen für Größe-Formelzeichen-Einheit verteilt auf die einzelnen LehrerInnen	347
D.16. Codehäufigkeiten der Unterkategorien von <i>Zusammenhang zwischen den Größen</i> für einzelne LehrerInnen	348
D.17. Codehäufigkeiten <i>Über Formel wird gesprochen</i> einzelne LehrerInnen	349

D.18. Codehäufigkeiten der Unterkategorien von <i>Über die Formel wird gesprochen</i> für einzelne LehrerInnen	351
D.19. Codehäufigkeiten zu <i>Erkenntnistheoretische Klassifizierung einer Formel</i> für einzelne LehrerInnen	352
D.20. Codehäufigkeiten der Unterkategorie <i>Klassifizierung der Formel</i> für einzelne LehrerInnen	355
D.21. Codehäufigkeiten der Ebenen des Ebenenmodells	356
D.22. Codehäufigkeiten der Ebenen für einzelne LehrerInnen	357
D.23. Codehäufigkeiten der Ebenen für einzelne LehrerInnen, Ebene I, IIA, IIB, III aufsummiert	358
D.24. Tafelbild mit dem Umstellen einer Formel (HBG2, TB), Bemerkung: Herr Lenz bezeichnet die Formel $R = \frac{U}{I}$ fälschlicher Weise als Ohmsches Gesetz.	362
D.25. Ausschnitt eines Tafelbilds zur Auswertung der Experimente zum Widerstandsgesetz (ABG5, TB)	366

Tabellenverzeichnis

2.1.	Beschreibung des Kerns der Disziplinen Mathematik und Physik ergänzt nach Galili (2018, S. 21-22)	15
3.1.	Die von Sherin (2001) identifizierten symbolic forms zur Bedeutungszuweisung mathematischer Ausdrücke in physikalischen Formeln	40
3.2.	Beschreibung von „epistemic games“ nach Tuminaro und Redish (2007, S. 5-8)	62
3.3.	Beschreibung von „epistemic framing cluster“ nach Bing und Redish (2009, S. 10)	63
5.1.	Vertikale Schichtung von Fachsprachen (Lothar Hoffmann, 1987, S. 64-71) & Adaption auf Physikunterricht (PU)	98
5.2.	Beschreibung der Ebenen des Ebenenmodells mit Beispielen	107
7.1.	Übersicht über die Forschungsmethodik	116
8.1.	Beispiele für die Ebenen des Ebenenmodells aus Lehrbuchanalysen, entnommen aus den Abschlussarbeiten von Baumgarten (2014), Haase (2015), Hauspurg (2015), Rothe (2014)	120
8.2.	Identifizierte Ebenen im Lehrbuch Cornelsen Volk und Wissen Physik Plus Klassenstufe 9, Thema Mechanik, adaptiert aus Haase (2015, S. 63)	122
8.3.	Versprachlichungen von $R = \varrho \cdot \frac{l}{A}$ durch TeilnehmerInnen einer Lehrerfortbildung (Rechtschreibung übernommen)	124
10.1.	Merkmale der Stichprobe	137
12.1.	Notierte und gesprochene Versionen der umgestellten Formeln zu $R = \frac{U}{I}$	154

12.2. Anzahl der LehrerInnen, bei denen die jeweilige Kategorie in der Stichprobe auftritt (genaue Aufstellung im Anhang in Tabellen D.4, D.5 und D.6)	213
13.1. Zuordnung der Kategorien von <i>Formel wird angewendet oder interpretiert</i> zu den Ebenen des Ebenenmodells	245
13.2. Ausprägung der Ebenengruppen bei einzelnen LehrerInnen	252
14.3. Aus der Theorie abgeleitete Aspekte von Formelverständnis und zugehörige in der Erhebung identifizierte Kategorien	267
14.1. Vorkommen der Kategorien bei LehrerInnen und Formeln - Teil 1	270
14.2. Vorkommen der Kategorien bei LehrerInnen und Formeln - Teil 2	271
15.1. Reihenfolge von Proportionalitäten	281
15.2. Zusammenfassung der Hinweise auf eher strukturellen oder technischen Umgang mit Mathematik	287
C.1. Intercoderübereinstimmungen insgesamt, nach Dokumenttypen, Formeln und Oberkategorien	330
C.2. Minimale und maximale Intercoderübereinstimmung für jeden Dokumententyp	330
C.3. Intracoderübereinstimmungen	332
D.1. Beschreibung des Umfangs der Erhebung nach LehrerInnen	334
D.2. Relative Codehäufigkeiten für <i>Rechnung</i> für einzelne LehrerInnen	340
D.3. Verteilung der für <i>Analogie</i> codierten Textstellen auf einzelne LehrerInnen	347
D.4. Verteilung der Codings in der Kategorie <i>Über Formel wird gesprochen</i> auf einzelne LehrerInnen für das Ohmsche Gesetz $I \sim U$	349
D.5. Verteilung Codings <i>Über Formel wird gesprochen</i> für $R = \frac{U}{I}$	350
D.6. Verteilung Codings <i>Über Formel wird gesprochen</i> für WG	350
D.7. Verteilung der inhaltlichen Ausprägungen in der Kategorie <i>Wichtigkeit oder Vorteile einer Formel</i> auf die einzelnen LehrerInnen	352
D.8. Verteilung der Codings in der Unterkategorie <i>Klassifizierung</i> auf einzelne LehrerInnen für die Definitionsformel $R = \frac{U}{I}$	353
D.9. Verteilung der Codings in der Unterkategorie <i>Klassifizierung</i> auf einzelne LehrerInnen für das Widerstandsgesetz $R = \rho \cdot \frac{l}{A}$	353

D.10. Verteilung der Codings in der Unterkategorie <i>Klassifizierung</i> auf einzelne LehrerInnen für das Ohmsche Gesetz $I \sim U$	354
D.11. Vorkommen der Unterkategorien bei LehrerInnen und Formeln . .	376
D.12. Vorkommen der Unterkategorien bei LehrerInnen und Formeln . .	377

Abkürzungsverzeichnis

abhg.	abhängig
Anw.b.	Anwendungsbereich
Berechn.	Berechnung
Beschr.	Beschreibung
Darstellungsf.	Darstellungsform
exp. / Exp.	experimentell / Experiment
FS	Fachsprache
FZ	Formelzeichen
geg.	gegeben
ges.	gesucht
ggf.	gegebenenfalls
gl. / Gleichh.	gleiche / Gleichheit
ggü.	gegenüber
Gültigk.b.	Gültigkeitsbedingungen
i. d. R.	in der Regel
Klassifiz.	Klassifizierung
künstl.	künstlich
m.	mit
math.	mathematisch
natürl.	natürlich
OG	Ohmsches Gesetz $I \sim U$
phys.	physikalisch
Prop.	Proportionalität
Quot./Prod.gl.h.	Quotienten- / Produktgleichheit
RUI	Definitionsformel des Widerstandes $R = \frac{U}{I}$
theoret. / Theo.	theoretisch / Theorie
US	Unterrichtssprache
Verallg.	Verallgemeinerung
Veränd.	Veränderung
WG	Widerstandsgesetz $R = \varrho \cdot \frac{l}{A}$
z. B.	zum Beispiel
Zshg.	Zusammenhang
zw.	zwischen

Literatur

- Ainsworth, Shaaron (2008). »The educational value of multiple-representations when learning complex scientific concepts«. In: *Visualization: Theory and practice in science education*. Springer, S. 191–208.
- Airey, John, Josefine Grundström Lindqvist und Rebecca Lippmann Kung (2019). »What Does It Mean to Understand a Physics Equation? A Study of Undergraduate Answers in Three Countries«. In: *Bridging Research and Practice in Science Education*. Hrsg. von Eilish McLoughlin, Odilla E. Finlayson, Sibel Erduran und Peter E. Childs. Cham: Springer Nature, S. 225–239.
- Angell, Carl, Øystein Guttersrud, Ellen K. Henriksen und Anders Isnes (2004). »Physics: Frightful, but fun. Pupils' and teachers' views of physics and physics teaching«. In: *Science Education* 88.5, S. 683–706.
- Apolin, Martin (2002). *Die Sprache in Physikschulbüchern unter besonderer Berücksichtigung von Texten zur speziellen Relativitätstheorie*. Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Naturwissenschaften. Universität Wien.
<https://www.univie.ac.at/pluslucis/Archiv/Diplomarbeiten/Apolin/index.html> (besucht am 10.01.2019).
- (2004). »Sprache im Physikunterricht«. In: *PLUS LUCIS* 1, S. 15–18.
https://www.oebv.at/downloads/products/bigbang/downloads/Die%7B%5C_%7DSprache%7B%5C_%7Dim%7B%5C_%7DPhysikunterricht-plus%7B%5C_%7Dlucis.pdf (besucht am 10.01.2019).
- Arons, Arnold (1973). »Toward wider public understanding of science«. In: *American Journal of Physics* 41.6, S. 769–782.
- Aufschnaiter, Claudia von und Helmut Prechtel (2018). »Argumentieren im naturwissenschaftlichen Unterricht«. In: *Theorien in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung*. Hrsg. von Dirk Krüger, Horst Schecker und Ilka Parchmann. Springer, S. 87–104.
- Bagno, Esther, Hana Berger und Bat-Sheva Eylon (2008). »Meeting the challenge of students' understanding of formulae in high-school physics: a learning tool«. In: *Physics Education* 43.1, S. 75–82.

- Bagno, Esther, Bat-Sheva Eylon und Hana Berger (2011). »How To Promote The Learning Of Physics From Formulae?« In: *GIREP-EPEC & PHEC 2009*, S. 77–83.
- Baumann, Klaus-Dieter (1998). »Das Postulat der Exaktheit für den Fachsprachengebrauch«. In: *Fachsprachen. Languages for Special Purposes. Ein internationales Handbuch zur Fachsprachenforschung und Terminologiewissenschaft. 1. Halbband*. Hrsg. von Lothar Hoffmann, Hartwig Kalverkämper und Herbert Ernst Wiegand. HSK 14.1. Berlin: de Gruyter, S. 373–377.
- Baumgarten, Willi (2014). *Analyse der sprachlichen Vorbereitung von Formeln in Physik-Lehrbüchern an ausgewählten Beispielen der Mechanik der Sekundarstufe 1*. Masterarbeit. TU Dresden.
- Becker, Andrea und Markus Hundt (1998). »Die Fachsprache in der einzelsprachlichen Differenzierung«. In: *Fachsprachen. Languages for Special Purposes. Ein internationales Handbuch zur Fachsprachenforschung und Terminologiewissenschaft. 1. Halbband*. Hrsg. von Lothar Hoffmann, Hartwig Kalverkämper und Herbert Ernst Wiegand. HSK 14.1. Berlin: de Gruyter, S. 118–133.
- Bing, Thomas J. und Edward F. Redish (2009). »Analyzing problem solving using math in physics: Epistemological framing via warrants«. In: *Physical Review Special Topics - Physics Education Research* 5.2, S. 1–23.
- Bolte, Claus und Reinhard Pastille (2010). »Naturwissenschaften zur Sprache bringen«. In: *Sprache, Mathematik und Naturwissenschaften (=ide-extra Bd. 16)*, S. 26–46.
- Bossé, Michael J., Kwaku Adu-Gyamfi und Meredith R. Cheetham (2011). »Assessing the difficulty of mathematical translations: Synthesizing the literature and novel findings«. In: *International Electronic Journal of Mathematics Education* 6.3, S. 113–133.
- Brown, Bryan a. und Kihyun Ryoo (2008). »Teaching science as a language: A “content-first” approach to science teaching«. In: *Journal of Research in Science Teaching* 45.5, S. 529–553.
- <http://doi.wiley.com/10.1002/tea.20255> (besucht am 26.04.2020).
- Bruner, Jerome S. (1974). *Entwurf einer Unterrichtstheorie*. Berlin: Berlin Verlag Arno Spitz.
- Carlsen, William S (1998). »Language and Science Learning«. In: *Handbook of Research on Science Education*. Hrsg. von Norman G. Abdell, Sandra K.; Lederman. 2003. New York, London. Kap. 3, S. 57–74.
- Childs, Peter E., Silvija Markic und Marie C. Ryan (2015). »The role of language in the teaching and learning of chemistry«. In: *Chemistry Education: Best Practices, Opportunities and Trends*. Hrsg. von J. Garcia-Martinez und E. Serrano-Torregrosa.

- Clement, John, Lochhead Jack und George S. Monk (2011). »Translation Difficulties in Learning Mathematics«. In: *The American Mathematical Monthly* 88.4, S. 286–290. (Besucht am 06. 11. 2019).
- Dee-Lucas, Diana und Jill H. Larkin (1991). »Equations in Scientific Proofs: Effects on Comprehension«. In: *American Educational Research Journal* 28.3, S. 661–682.
- Dirac, Paul Adrieen Maurice (1939). »The relation between Mathematics and Physics«. In: *Proceedings of the Royal Society* 59.II, S. 122–129.
- (1977). »Annahmen und Voreingenommenheit in der Physik«. In: *Naturwissenschaftliche Rundschau* 30, S. 429–432.
- DiSessa, Andrea A (1993). »Toward an epistemology of physics«. In: *Cognition and instruction* 10.2-3, S. 105–225.
- diSessa, Andrea A. (2004). »Metarepresentation: Native competence and targets for instruction«. In: *Cognition and instruction* 22.3, S. 293–331.
- Domert, Daniel, John Airey, Cedric Linder und Rebecca Lippmann Kung (2012). »An exploration of university physics students' epistemological mindsets towards the understanding of physics equations«. In: *Nordic Studies in Science Education* 3.1, S. 15.
- Eichenlaub, Mark und Edward F. Redish (2019). »Blending Physical Knowledge with Mathematical Form in Physics Problem Solving«. In: *Mathematics in Physics Education*. Hrsg. von Gesche Pospiech, Marisa Michelini und Bat-Sheva Eylon. Cham: Springer International Publishing, S. 127–151.
- Eisenreich, Günther (1998a). »Die neuere Fachsprache der Mathematik seit Carl Friedrich Gauß«. In: *Fachsprachen. Languages for Special Purposes. Ein internationales Handbuch zur Fachsprachenforschung und Terminologiewissenschaft. 1. Halbband*. Hrsg. von Lothar Hoffmann, Hartwig Kalverkämper und Herbert Ernst Wiegand. HSK 14.1. Berlin: de Gruyter, S. 1222–1230.
- (1998b). »Die neuere Fachsprache der Physik seit der Mitte des 19. Jahrhunderts«. In: *Fachsprachen. Languages for Special Purposes. Ein internationales Handbuch zur Fachsprachenforschung und Terminologiewissenschaft. 1. Halbband*. Hrsg. von Lothar Hoffmann, Hartwig Kalverkämper und Herbert Ernst Wiegand. HSK 14.1. Berlin: de Gruyter, S. 1231–1235.
- Falkenburg, Brigitte (1999). »Sprache und Anschauung in der modernen Physik«. In: *Sprache und Sprachen in den Wissenschaften. Geschichte und Gegenwart. Festschrift für Walter de Gruyter & Co. anlässlich einer 250jährigen Verlagstradition*. Hrsg. von Herbert Ernst Wiegand. Berlin: de Gruyter, S. 89–118.
- Faraday, Michael (1990a). »Faraday to Maxwell, 13 November 1857«. zit. nach Gingras (2001) S.397. In: *The scientific letters and papers of James Clerk Maxwell*. Hrsg. von P. M. Harman. Cambridge.

- Faraday, Michael (1990b). »Faraday to Maxwell, 25 March 1857«. zit. nach Gingras (2001) S.404. In: *The scientific letters and papers of James Clerk Maxwell*. Hrsg. von P. M. Harman. Cambridge.
- Feynman, Richard P (1997). *Vom Wesen physikalischer Gesetze*. München: Piper.
- Fijas, Liane (1998). »Das Postulat der Ökonomie für den Fachsprachengebrauch«. In: *Fachsprachen. Languages for Special Purposes. Ein internationales Handbuch zur Fachsprachenforschung und Terminologiewissenschaft. 1. Halbband*. Hrsg. von Lothar Hoffmann, Hartwig Kalverkämper und Herbert Ernst Wiegand. HSK 14.1. Berlin: de Gruyter, S. 390–397.
- Fischer, Roland (2006). *Materialisierung und Organisation: Zur kulturellen Bedeutung der Mathematik*. Klagenfurter Beiträge zur Didaktik der Mathematik. München/Wien: Profil Verlag.
- Fraas, Claudia (1998). »Lexikalisch-semantische Eigenschaften von Fachtexten«. In: *Fachsprachen. Languages for Special Purposes. Ein internationales Handbuch zur Fachsprachenforschung und Terminologiewissenschaft. 1. Halbband*. Hrsg. von Lothar Hoffmann, Hartwig Kalverkämper und Herbert Ernst Wiegand. HSK 14.1. Berlin: de Gruyter, S. 428–438.
- Frey, Gerhard (1967). *Die Mathematisierung unserer Welt*. Urban Bücher. Die Wissenschaftliche Taschenbuchreihe 105. Stuttgart: Kohlhammer.
- Friebe, Cord, Meinhard Kuhlmann, Holger Lyre, Paul M. Näger, Oliver Passon und Manfred Stöckler (2015). *Philosophie der Quantenphysik: Zentrale Begriffe, Probleme, Positionen*. Heidelberg: Springer Spektrum.
- Galilei, Galileo (1896). *II Saggiatore. Bd. 6*. zit. nach Krey (2012), S.38. Edition Nazionale.
- Galili, Igal (2018). »Physics and Mathematics as Interwoven Disciplines in Science Education«. In: *Science & Education* 27.1-2, S. 7–37.
- Geyer, Marie-Annette (2020). *Physikalisch-mathematische Darstellungswechsel funktionaler Zusammenhänge. Das Vorgehen von SchülerInnen der Sekundarstufe 1 und ihre Schwierigkeiten*. Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Dr. rer. nat. Berlin.
- Geyer, Marie-Annette und Wiebke Kuske-Janßen (2019). »Mathematical Representations in Physics Lessons«. In: *Mathematics in Physics Education*. Hrsg. von Gesche Pospiech, Marisa Michelini und Bat-Sheva Eylon. Cham: Springer Nature, S. 75–102.
- Gingras, Yves (2001). »What did mathematics do to physics?«. In: *History of science*, S. 383–416.
<http://adsabs.harvard.edu/full/2001HisSc...39...383G> (besucht am 28.04.2020).
- Gogolin, Ingrid und Joana Duarte (2016). »Bildungssprache«. In: *Handbuch Sprache in der Bildung* 21. Hrsg. von Jörg Kilian, Birgit Brouër und Dina Lüttenberg, S. 478.

- Greca, Ileana Maria und Ana Raquel Pereira de Ataíde (2019). »Theorems-in-Action for Problem-Solving and Epistemic Views on the Relationship Between Physics and Mathematics Among Preservice Physics Teachers«. In: *Mathematics in Physics Education*. Hrsg. von Gesche Pospiech, Marisa Michelini und Bat-Sheva Eylon, S. 153–173.
- Greca, Ileana Maria und Marco Antonio Moreira (2001). »Mental, physical, and mathematical models in the teaching and learning of physics«. In: *Science Education* 86.1, S. 106–121.
- Haase, Jens (2015). *Analyse der Versprachlichung von Formeln zum Thema Mechanik in Lehrbüchern der Klassenstufen 6 und 9*. Masterarbeit.
- Hahn, Walther von (1998). »Das Postulat der Explizitheit für den Fachsprachengebrauch«. In: *Fachsprachen. Languages for Special Purposes. Ein internationales Handbuch zur Fachsprachenforschung und Terminologiewissenschaft*. 1. Halbband. Hrsg. von Lothar Hoffmann, Hartwig Kalverkämper und Herbert Ernst Wiegand. HSK 14.1. Berlin: de Gruyter, S. 383–389.
- Hammer, David (2000). »Student resources for learning introductory physics«. In: *American Journal of Physics* 68.S1, S52–S59.
- Härtig, Hendrik, Sascha Bernholt, Helmut Prectl und Jan Retelsdorf (2015). »Unterrichtssprache im Fachunterricht – Stand der Forschung und Forschungsperspektiven am Beispiel des Textverständnisses«. In: *ZfDN* 21.1, S. 55–67.
<http://pubs.acs.org/doi/10.1021/nl401365n>
<http://link.springer.com/10.1007/s40573-015-0027-7> (besucht am 10. 01. 2019).
- Härtig, Hendrik und Tina Stosik (2015). »Wortschatztraining im Physikunterricht«. In: *MNU* 68.3, S. 155–159.
- Hauspurg, Martin (2015). *Analse der Einführung und Übung funktionaler Zusammenhänge bezüglich Darstellungswechsel in Lehrbüchern der Klassenstufe 8*. Masterarbeit.
- Hechter, Richard P. (2010). »What does 'I understand the equation' really mean?«. In: *Physics Education* 45.2, S. 132–133.
- Heck, André und Onne van Buuren (2019). »Students' Understanding of Algebraic Concepts«. In: *Mathematics in Physics Education*. Hrsg. von Gesche Pospiech, Marisa Michelini und Bat-Sheva Eylon. Cham: Springer Nature, S. 53–74.
- Heering, Peter und Kerstin Kremer (2018). »Nature of Science«. In: *Theorien in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 105–119.
- Heywood, David und Joan Parker (2010). »Language Interpretation and Meaning«. In: *The Pedagogy of Physical Science*. Hrsg. von David Heywood und Joan Parker. Bd. 38. Springer Science+Business Media B.V. Kap. 5, S. 93–112.

- Hofe, Rudolf vom (1992). »Grundvorstellungen mathematischer Inhalte als didaktisches Modell«. In: *Journal für Mathematik-Didaktik* 13.92, S. 345–364.
- (2019). *Grundvorstellungen – Basis für inhaltliches Denken*. Folien online verfügbar. TU Dresden: Vortrag im Mathematikdidaktischen Kolloquium 27.06.19.
<https://static1.squarespace.com/static/55b89961e4b09065f417d684/t/5d39e406440f500001473cbc/1564075111128/GV+2019+Dresden.pdf> (besucht am 05.11.2019).
- Hofe, Rudolf vom und Werner Blum (2016). »“Grundvorstellungen” as a Category of Subject-Matter Didactics«. In: *Journal für Mathematik-Didaktik* 37.S1, S. 225–254.
- Hoffmann, Lore, Peter Häußler und Manfred Lehrke (1998). *Die IPN-Interessenstudie Physik*. Kiel: IPN.
- Hoffmann, Lothar (1987). *Kommunikationsmittel Fachsprache. Eine Einführung*. 3., durchgesehene Auflage. Berlin: Akademie-V.
- (1998). »Syntaktische und morphologische Eigenschaften von Fachsprachen«. In: *Fachsprachen. Languages for Special Purposes. Ein internationales Handbuch zur Fachsprachenforschung und Terminologiewissenschaft*. 1. Halbband. Hrsg. von Lothar Hoffmann, Hartwig Kalverkämper und Herbert Ernst Wiegand. HSK 14.1. Berlin: de Gruyter, S. 416–427.
- Hoffmann, Michael (2007). *Funktionale Varietäten des Deutschen – kurz gefasst*.
https://publishup.uni-potsdam.de/opus4-ubp/frontdoor/deliver/index/docId/1292/file/Funktionale%7B%5C_%7DVarietaeten%7B%5C_%7Ddes%7B%5C_%7DDeutschen.pdf (besucht am 09.01.2019).
- Höttecke, Dietmar (2001). »Die Vorstellung von Schülern und Schülerinnen von der „Natur der Naturwissenschaft“«. In: *ZfDN* 7, S. 7–23.
- Höttecke, Dietmar, Timo Ehmke, Claus Krieger und Marta Anna Kulik (2017). »Vergleichende Messung fachsprachlicher Fähigkeiten in den Domänen Physik und Sport«. In: *ZfDN*, S. 53–69.
- Höttecke, Dietmar und Martin Hopf (2018). »Schülervorstellungen zur Natur der Naturwissenschaften«. In: *Schülervorstellungen und Physikunterricht*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 271–287.
- Hund, Friedrich (1972). *Geschichte der physikalischen Begriffe*. B.I.-Hochschultaschenbücher. Mannheim: Bibliographisches Institut AG.
- Janßen, Wiebke (2013). *Auf dem Weg zu Fach- und Sprachkompetenz. Analyse von Lehrbuchtexten der Sekundarstufe 1 zum Thema Elektrizitätslehre unter sprachwissenschaftlichen und physikdidaktischen Gesichtspunkten*. Masterarbeit. Dresden.
<http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-158006> (besucht am 25.04.2018).

- Janßen, Wiebke und Gesche Pospiech (2015). »Versprachlichung von Formeln. Die Bedeutung von Formeln und ihre Vermittlung«. In: *PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*, S. 593–595.
- (2016a). »Formeln entschlüsseln. Ein Modell und Methoden-Werkzeuge zur Übersetzung von Formeln«. In: *Naturwissenschaften im Unterricht Physik* 27.153/154, S. 43–50.
 - (2016b). »Formeln physikalisch interpretieren und verstehen. Methoden und Anregungen für den Unterricht«. In: *Naturwissenschaften im Unterricht Physik* 27.153/154, S. 51–55.
 - (2016c). »Lehrer sprechen in und über Formeln«. In: *Authentizität und Lernen - das Fach in der Fachdidaktik. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Jahrestagung in Berlin 2015*. Hrsg. von Christian Maurer. Kiel: IPN.
<http://www.gdcp.de/index.php/tagungsbaende/tagungsband-uebersicht/164-tagungsbaende/2016/10598-concatenate-d47-a47-10598> (besucht am 31.07.2017).
 - (2016d). »Versprachlichung von Formeln und physikalisches Formelverständnis«. In: *Heterogenität und Diversität - Vielfalt der Voraussetzungen im naturwissenschaftlichen Unterricht. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Jahrestagung in Berlin 2015*. Hrsg. von Sascha Bernholt. Regensburg: Universität Regensburg.
<http://www.gdcp.de/index.php/tagungsbaende/tagungsband-uebersicht/161-tagungsbaende/2015/10170-2015-4438> (besucht am 31.07.2017).
- Kalverkämper, Hartwig (1998). »Fach und Fachwissen«. In: *Fachsprachen. Languages for Special Purposes. Ein internationales Handbuch. 1. Halbband*. Hrsg. von Lothar Hoffmann. Berlin: de Gruyter, S. 1–24.
- Karam, Ricardo und Olaf Krey (2015). »Quod erat demonstrandum: Understanding and Explaining Equations in Physics Teacher Education«. In: *Science & Education* 24.5-6, S. 661–698.
- Karam, Ricardo, Gesche Pospiech und Mauricio Pietrocola (2011). »Mathematik im Physikunterricht: Entwicklung struktureller Fähigkeiten«. In: *Naturwissenschaftliche Bildung als Beitrag zur Gestaltung partizipativer Demokratie*. Hrsg. von Dietmar Höttecke. Münster, S. 173–175.
- Karam, Ricardo, Olaf Uhden und Dietmar Höttecke (2019). »The “math as prerequisite” illusion: Historical considerations and implications for physics teaching«. In: *Mathematics in Physics Education*. Hrsg. von Gesche Pospiech, Marisa Micheleni und Bat-Sheva Eylon. Cham: Springer Nature, S. 37–52.
- Khishfe, Rola und Fouad Abd-El-Khalick (2002). »Influence of explicit and reflective versus implicit inquiry-oriented instruction on sixth graders’ views of nature of

- science«. In: *Journal of Research in Science Teaching: The Official Journal of the National Association for Research in Science Teaching* 39.7, S. 551–578.
- Kieran, Carolyn (1981). »Concepts associated with the equality symbol«. In: *Educational studies in Mathematics* 12.3, S. 317–326.
- <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/BF00311062.pdf> (besucht am 06.11.2019).
- Kim, Eunsook und Sung-Jae Pak (2002). »Students do not overcome conceptual difficulties after solving 1000 traditional problems«. In: *American Journal of Physics* 70.7, S. 759–765.
- Kimpel, Lennart (2018). *Aufgaben in der Allgemeinen Chemie: zum Zusammenspiel von chemischem Verständnis und Rechenfähigkeit*. Studien zum Physik- und Chemielernen 249. Berlin: Logos.
- Krey, Olaf (2012). *Zur Rolle der Mathematik in der Physik: wissenschaftstheoretische Aspekte und Vorstellungen Physiklerner*. Studien zum Physik- und Chemielernen 130. Berlin: Logos.
- <http://opus.kobv.de/ubp/volltexte/2012/5941/> (besucht am 27.04.2020).
- Krey, Olaf und Ricardo Karam (2016). »Mathematik in der Physik - muss das sein? Und wenn ja, warum und wozu?«. In: *Naturwissenschaften im Unterricht Physik* 153/154. Hrsg. von Gesche Pospiech und Ricardo Karam, S. 7–13.
- Krey, Olaf und Julia Schwanewedel (2018). »Lernen mit externen Repräsentationen«. In: *Theorien in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung*. Hrsg. von Dirk Krüger, Ilka Parchmann und Horst Schecker. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 159–175.
- Kruse, Jan (2015). *Qualitative Interviewforschung. Ein integrativer Ansatz*. Weinheim und Basel: Beltz Juventa.
- Kuckartz, Udo (2016). *Qualitative Inhaltsanalyse, Methoden, Praxis, Computerunterstützung*. 3., überarbeitete Auflage. Weinheim, Basel: Beltz Juventa.
- Kulgemeyer, Christoph (2010). *Physikalische Kommunikationskompetenz. Modellierung und Diagnostik*. Hrsg. von Hans Niedderer, Helmut Fischler und Elke Sumfleth. Studien zum Physik- und Chemielernen 108. Berlin: Logos.
- Kulgemeyer, Christoph und Horst Schecker (2009). »Kommunikationskompetenz in der Physik : Zur Entwicklung eines domänenspezifischen Kommunikationsbegriffs Physics Communication Competence : on the development of a domain-specific concept of communication«. In: *ZfDN* 15, S. 131–153.
- (2012). »Physikalische Kommunikationskompetenz – Empirische Validierung eines normativen Modells Empirical validation of a model for physics-related communication competence«. In: *ZfDN* 18, S. 29–54.

- Kultusministerkonferenz (2004). *Einheitliche Prüfungsanforderungen in der Abiturprüfung Physik. Beschluss der Kultusministerkonferenz vom 01.12.1989 i.d.F. vom 05.02.2004.*
- (2005). *Bildungsstandards im Fach Physik für den Mittleren Schulabschluss. Beschluss vom 16.12.2004.* Hrsg. von Sekretariat der Ständigen Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland.
- Lederman, Norman G. (2007). »Nature of Science: Past, Present, and Future«. In: *Handbook of Research on Science Education.* Hrsg. von Norman G. Lederman und Sandra K. Abell. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, S. 831–880.
- Lehavi, Yaron, Roni Mualem, Esther Bagno, Bat-Sheva Eylon und Gesche Pospiech (2019). »Taking the Phys-Math Interplay from Research into Practice«. In: *Mathematics in Physics Education.* Hrsg. von Gesche Pospiech, Marisa Michelini und Bat-Sheva Eylon. Cham: Springer, S. 335–353.
- Leisen, Josef (1998). »Sprache(n) im Physikunterricht«. In: *Praxis der Naturwissenschaften - Physik* 2.47, S. 2–4.
- (2005a). »Muss ich jetzt auch noch Sprache unterrichten ? – Sprache und Physikunterricht«. In: *Naturwissenschaften im Unterricht Physik* 3, S. 4–9.
- (2005b). »Wechsel der Darstellungsformen. Ein Unterrichtsprinzip für alle Fächer«. In: *Der Fremdsprachliche Unterricht Englisch* 78, S. 9–11.
- (2005c). »Wechsel der Darstellungsformen. Eine wichtige Strategie im kommunikativen Physikunterricht«. In: *Naturwissenschaften im Unterricht - Physik* 3.16, S. 10–11.
- Lemke, Jay L. (1990). *Talking Science: Language, Learning and Values.* Norwood: Ablex Publishing Corporation.
- <http://files.eric.ed.gov/fulltext/ED362379.pdf> (besucht am 21.01.2019).
- (2004). »The literacies of science«. In: *Crossing borders in literacy and science instruction: Perspectives on theory and practice.* Hrsg. von E. Wendy Saul. Newark, DE: International Reading Association und Arlington, S. 33–47.
- Linke, Angelika, Markus Nussbaumer und Paul R. Portmann (2004). *Studienbuch Linguistik. Ergänzt um ein Kapitel Phonetik/Phonologie von Urs Willi.* 5., erweiterte Auflage. Reihe Germanistische Linguistik 121. Tübingen: Niemeyer.
- Magnusson, Shirley, Joseph Krajcik und Hilda Borko (1999). »Nature, sources, and development of pedagogical content knowledge for science teaching«. In: *Examining pedagogical content knowledge.* Dordrecht: Springer, S. 95–132.
- Malle, Günther (1982). »Zur Fähigkeit von Schülern im Aufstellen und Interpretieren von Formeln«. In: *Didaktikhefte der Österreichischen Mathematischen Gesellschaft* 9, S. 244–266.

- Markic, Silvija (2017). *Chemistry teachers' pedagogical scientific language knowledge*. Paper presented at the 12th Conference of the European Science Education Research Association (ESERA).
https://keynote.conference-services.net/resources/444/5233/pdf/ESERA2017_1315_paper.pdf (besucht am 10.01.2019).
- Markic, Silvija, Joanne Broggy und Peter E. Childs (2013). »How to deal with linguistic issues in chemistry classes«. In: *Teaching chemistry – A studybook*. Hrsg. von Ingo Eilks und Avi Hofstein. Rotterdam: Sense, S. 127–152.
- Merzyn, Gottfried (1987). »Die Sprache unserer Schulbücher«. In: *Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht* 40.2, S. 75–80.
- (1998). »Sprache und naturwissenschaftlicher Unterricht, 10 Thesen«. In: *Praxis der Naturwissenschaften – Physik* 47.2, S. 1.
- Meyer, Lothar und Gerd-Dietrich Schmidt, Hrsg. (2005). *Level Physik 8 Gymnasium Sachsen*. Berlin: Duden Paetec.
- Muckenfuß, Heinz (1995). *Lernen im sinnstiftenden Kontext. Entwurf einer zeitgemäßen Didaktik des Physikunterrichts*. Berlin: Cornelsen.
- Müller, Rainer (2006). »Kontextorientierung und Alltagsbezug«. In: *Physikdidaktik. Praxishandbuch für die Sekundarstufe I und II*. Hrsg. von Helmut F. Mielk. Berlin: Cornelsen Scriptor, S. 102–119.
- Müller, Rainer und Elke Heise (2006). »Formeln in physikalischen Texten: Einstellung und Textverständnis von Schülerinnen und Schülern«. In: *PhyDid A - Physik und Didaktik in Schule und Hochschule* 2.5, S. 62–70.
- Munroe, Randall (2008). *Fields arranged by Purity*.
<https://xkcd.com/435/> (besucht am 29.04.2019).
- Nitz, Sandra und Sabine Fechner (2018). »Mentale Modelle«. In: *Theorien in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung*. Hrsg. von Dirk Krüger, Ilka Parchmann und Horst Schecker. Berlin: Springer, S. 69–86.
- Ornek, Funda, William Robinson und Mark Haugan (2007). »What Makes Physics Difficult«. In: *Science Education International* 18.3, S. 165–172.
- Oskar, Els (1998). »Das Postulat der Anonymität für den Fachsprachengebrauch«. In: *Fachsprachen. Languages for Special Purposes. Ein internationales Handbuch zur Fachsprachenforschung und Terminologiewissenschaft. 1. Halbband*. Hrsg. von Lothar Hoffmann, Hartwig Kalverkämper und Herbert Ernst Wiegand. HSK 14.1. Berlin: de Gruyter, S. 397–401.
- Peirce, Charles S. (1931–1935). *Collected papers of Charles Sanders Peirce. Volume I–VI*. Hrsg. von Charles Hartshorne und Paul Weiss. Cambridge, Mass.: Belknap Press.

- Pereira de Ataíde, Ana Raquel und Ileana Maria Greca (2013). »Epistemic Views of the Relationship Between Physics and Mathematics: Its Influence on the Approach of Undergraduate Students to Problem Solving«. In: *Science and Education* 22, S. 1405–1421.
- Pietrocola, Mauricio (2008). »Mathematics as Structural Language of Physical Thoughts«. In: *Connecting Research in Physics Education with Teacher Education. International Commission on Physics Education*. Hrsg. von Elena Vicentini Matilde; Sassi. Bd. 18. 2. International Commission of Physics Education.
<http://web.phys.ksu.edu/ICPE/Publications/teach2/Pietrocola.pdf> (besucht am 28.04.2020).
- Planinic, Maja, Lana Ivanjek, Ana Susac und Zeljka Milin-Sipus (2013). »Comparison of university students' understanding of graphs in different contexts«. In: *Physical review special topics - Physics education research* 9.2, S. 020103.
- Pospiech, Gesche (2019). »Framework of Mathematization in Physics from a Teaching Perspective«. In: *Mathematics in Physics Education*. Hrsg. von Gesche Pospiech, Marisa Michelini und Bat-Sheva Eylon. Cham: Springer Nature, S. 1–33.
- Pospiech, Gesche, Bat-Sheva Eylon, Esther Bagno und Yaron Lehavi (2019). »Role of teachers as facilitators of the interplay Physics and Mathematics«. In: *Mathematics in Physics Education*. Hrsg. von Gesche Pospiech, Marisa Michelini und Bat-Sheva Eylon. Cham: Springer, S. 269–291.
- Pospiech, Gesche, Marisa Michelini und Bat-Sheva Eylon, Hrsg. (2019). *Mathematics in Physics Education*. Cham: Springer Nature.
- Pospiech, Gesche und Erik Oese (2013). »The Use of Mathematical Elements in Physics – View of Grade 8 Pupils«. In: *ICPE-EPEC 2013 Proceedings*, S. 199–205.
- Prediger, Susanne (2009). »Inhaltliches Denken vor Kalkül – Ein didaktisches Prinzip zur Vorbeugung und Förderung bei Rechenschwierigkeiten«. In: *Fördernder Mathematikunterricht in der Sekundarstufe I*. Hrsg. von Siegbert Fritz Annemarie; Schmidt. Weinheim: Beltz Verlag, S. 213–234.
- Prediger, Susanne und Lena Wessel (2011). »Darstellen - Deuten - Darstellungen vernetzen. Ein fach- und sprachintegrierter Förderansatz für mehrsprachige Lernende im Mathematikunterricht«. In: *Mathematiklernen unter Bedingungen der Mehrsprachigkeit. Stand und Perspektiven der Forschung und Entwicklung in Deutschland*. Hrsg. von Susanne Prediger und Erkan Özdil. Münster u.a.: Waxmann.
- Primas, Hans (2001). »Die Wirklichkeit des Symbols in den exakten Wissenschaften«. In: *Vortragsmanuskript zum Symposium „Kunst als Wissenschaft – Wissenschaft als Kunst“*. Berlin.

- Rebello, Sanjay und Lili Cui (2008). »Retention and transfer of learning from math to physics to engineering«. In: *ASEE Annual Conference and Exposition, Conference Proceedings*.
- Redish, Edward F. (1994). »Implications of cognitive studies for teaching physics«. In: *American Journal of Physics* 62.9, S. 796–803.
- Redish, Edward F. und Eric Kuo (2015). »Language of Physics, Language of Math: Disciplinary Culture and Dynamic Epistemology«. In: *Science & Education* 24.5-6, S. 561–590.
- Rincke, Karsten (2007). *Sprachentwicklung und Fachlernen im Mechanikunterricht. Sprache und Kommunikation bei der Einführung in den Kraftbegriff*. Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades in der Naturwissenschaften.
<http://www.urn.fi/urn:nbn:de:hebis:34-2007101519358> (besucht am 27.04.2020).
- (2010). »Von der Alltagssprache zur Fachsprache – Bruch oder schrittweiser Übergang?«. In: *Sprache, Mathematik und Naturwissenschaften*. Hrsg. von Gabriele Fenkhardt, Anja Lembens und Edith Zeitlinger-Erlacher. ide-extra 16. Innsbruck: Studien Verlag, S. 47–62.
- Rincke, Karsten und Silvija Markic (2018). »Sprache und das Lernen von Naturwissenschaften«. In: *Theorien in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung*. Hrsg. von Dirk Krüger, Horst Schecker und Ilka Parchmann. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 31–48.
- Romer, Robert H (1993). »Reading the equations and confronting the phenomena — The delights and dilemmas of physics teaching«. In: *American Journal of Physics* 61.128.
<https://doi.org/10.1119/1.17327> (besucht am 04.11.2019).
- Rothe, Paulo (2014). *Lehrbuchanalyse hinsichtlich der Versprachlichung von Formeln im Lernbereich Elektrizitätslehre in den Klassenstufen 7 und 8 in Oberschulen und Gymnasien*. Bachelorarbeit.
- Rusch, Gebhard (1999). »Eine Kommunikationstheorie für kognitive Systeme«. In: *Konstruktivismus in der Medien- und Kommunikationswissenschaft*. Hrsg. von Gebhard Rusch und Siegfried J. Schmidt. Frankfurt a. M.: Suhrkamp, S. 150–184.
- Schecker, Horst (1985). *Das Schülerverständnis zur Mechanik: eine Untersuchung in der Sekundarstufe II unter Einbeziehung historischer und wissenschaftstheoretischer Aspekte*. Dissertation. Universität Bremen.
- Sfard, Anna (2008). *Thinking as Communicating. Human Development, the Growth of Discourses, and Mathematizing*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Sherin, Bruce L. (2001). »How students understand physics equations«. In: *Cognition and instruction* 19.4, S. 479–541.

- Shulman, Lee (1987). »Knowledge and teaching: Foundations of the new reform«. In: *Harvard educational review* 57.1, S. 1–23.
- Skemp, Richard R. (1976). »Relational Understanding and Instrumental Understanding«. In: *Mathematics Teaching* 77. reprinted in: *Mathematics Teaching in the Middle School*, 2006, 12/2, S.88-95.
- SMK, Sächsisches Staatsministerium für Kultus und Sport (2009). *Lehrplan Mittelschule Physik*. Saxoprint. Dresden.
https://www3.sachsen.schule/fileadmin/_special/gruppen/6/pdf/lp_ms_physik_2009.pdf (besucht am 28.04.2018).
- (2011). *Lehrplan Gymnasium Physik*. Saxoprint. Dresden.
https://www.schule.sachsen.de/lpdb/web/downloads/lp_gy_physik_2011.pdf (besucht am 28.04.2018).
- Statistisches Landesamt des Freistaates Sachsen (2016). *Statistisch betrachtet. Schulen in Sachsen - Ausgabe 2016*.
https://www.statistik.sachsen.de/download/300_Voe-Faltblatt/SB_Schulen_2016_Internet.pdf (besucht am 21.08.2018).
- Steinke, Ines (2013). »Gütekriterien qualitativer Forschung«. In: *Qualitative Forschung. Ein Handbuch*. Hrsg. von Uwe Flick, Ernst von Kardorff und Ines Steinke. Reinbek bei Hamburg: Rowohlt, S. 319–331.
- Strahl, Alexander, Julian Grobe und Rainer Müller (2010). »Was schreckt bei Formeln ab? - Untersuchung zur Darstellung von Formeln«. In: *PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*.
<http://phydid.physik.fu-berlin.de/index.php/phydid-b/article/view/169> (besucht am 19.11.2019).
- Strahl, Alexander, Ulf Schleusner, Matthias Mohr und Rainer Müller (2010). »Wie Schüler Formeln gliedern – eine explorative Studie«. In: *Physik und Didaktik in Schule und Hochschule* 9.1, S. 18–24.
- Strahl, Alexander, Sabrina Thiele und Rainer Müller (2013). »Formeln in Physik(schul)-büchern – eine quantitative Untersuchung«. In: *Inquiry-based Learning - Forschendes Lernen*. Hrsg. von Sascha Bernholt. Kiel: IPN, S. 329–331.
https://www.gdcp.de/images/tb2013/TB2013_329_Strahl.pdf (besucht am 27.04.2020).
- Strahl, Alexander, Lars-Jochen Thoms und Rainer Müller (2012). »Warum und wofür sind Formeln wichtig? Lehrervorstellungen zur Formelnutzung«. In: *Konzepte fachdidaktischer Strukturierung für den Unterricht*. Hrsg. von Sascha Bernholt. 2012. Münster: LIT-Verlag, S. 319–321.

- Thoms, Lars-Jochen (2011). »Formelnutzung in der Physik«. Examensarbeit. Technische Universität Carolo-Wilhemina zu Braunschweig.
- Tuminaro, Jonathan und Edward F. Redish (2007). »Elements of a cognitive model of physics problem solving: Epistemic games«. In: *Physical Review Special Topics - Physics Education Research* 3.2, S. 020101.
<https://journals.aps.org/prper/abstract/10.1103/PhysRevSTPER.3.020101> (besucht am 27.04.2020).
- Uhden, Olaf (2012). *Mathematisches Denken im Physikunterricht / Theorieentwicklung und Problemanalyse*. Studien zum Physik- und Chemielernen 133. Berlin: Logos.
<http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-90960> (besucht am 26.04.2020).
- Wagenschein, Martin (1962). »Rechtzeitigkeit der physikalischen Begriffsbildung«. In: *Die pädagogische Dimension der Physik*. Braunschweig: Westermann. Kap. XII, S. 166–181.
- (1988). *Naturphänomene sehen und verstehen. Genetische Lehrgänge*. 2., korrigierte Auflage. Stuttgart: Klett.
- Wigner, Eugene P. (1960). »The unreasonable effectiveness of mathematics in the natural sciences.« In: *Communications on Pure and Applied Mathematics* 13.1, S. 1–14.
- Wilhelm, Thomas (2013). »Haben Gleichungen eine Wirkrichtung?« In: *Praxis der Naturwissenschaften-Physik in der Schule* 62.2, S. 23–24.
- Wilhelm, Thomas und Martin Hopf (2018). »Schülervorstellungen zum elektrischen Stromkreis«. In: *Schülervorstellungen und Physikunterricht. Ein Lehrbuch für Studium, Referendariat und Unterrichtspraxis*. Hrsg. von Horst Schecker, Thomas Wilhelm, Martin Hopf und Reinders Duit. Berlin: Springer Spektrum, S. 115–138.
- Wodzinski, Rita (2007). »Mädchen im Physikunterricht«. In: *Physikdidaktik. Theorie und Praxis*. Hrsg. von Ernst Kircher, Raimund Girwidz und Peter Häußler. Berlin: Springer, S. 559–580.

Bisher erschienene Bände der Reihe „*Studien zum Physik- und Chemielernen*“

ISSN 1614-8967 (vormals *Studien zum Physiklernen* ISSN 1435-5280)

- 1 Helmut Fischler, Jochen Peuckert (Hrsg.): Concept Mapping in fachdidaktischen Forschungsprojekten der Physik und Chemie
ISBN 978-3-89722-256-4 40.50 EUR
- 2 Anja Schoster: Bedeutungsentwicklungsprozesse beim Lösen algorithmischer Physikaufgaben. *Eine Fallstudie zu Lernprozessen von Schülern im Physiknachhilfeunterricht während der Bearbeitung algorithmischer Physikaufgaben*
ISBN 978-3-89722-045-4 40.50 EUR
- 3 Claudia von Aufschnaiter: Bedeutungsentwicklungen, Interaktionen und situatives Erleben beim Bearbeiten physikalischer Aufgaben
ISBN 978-3-89722-143-7 40.50 EUR
- 4 Susanne Haerberlen: Lernprozesse im Unterricht mit Wasserstromkreisen. *Eine Fallstudie in der Sekundarstufe I*
ISBN 978-3-89722-172-7 40.50 EUR
- 5 Kerstin Haller: Über den Zusammenhang von Handlungen und Zielen. *Eine empirische Untersuchung zu Lernprozessen im physikalischen Praktikum*
ISBN 978-3-89722-242-7 40.50 EUR
- 6 Michaela Horstendahl: Motivationale Orientierungen im Physikunterricht
ISBN 978-3-89722-227-4 50.00 EUR
- 7 Stefan Deylitz: Lernergebnisse in der Quanten-Atomphysik. *Evaluation des Bremer Unterrichtskonzepts*
ISBN 978-3-89722-291-5 40.50 EUR
- 8 Lorenz Huckle: Handlungsregulation und Wissenserwerb in traditionellen und computergestützten Experimenten des physikalischen Praktikums
ISBN 978-3-89722-316-5 50.00 EUR
- 9 Heike Theyßen: Ein Physikpraktikum für Studierende der Medizin. *Darstellung der Entwicklung und Evaluation eines adressatenspezifischen Praktikums nach dem Modell der Didaktischen Rekonstruktion*
ISBN 978-3-89722-334-9 40.50 EUR
- 10 Annette Schick: Der Einfluß von Interesse und anderen selbstbezogenen Kognitionen auf Handlungen im Physikunterricht. *Fallstudien zu Interessenhandlungen im Physikunterricht*
ISBN 978-3-89722-380-6 40.50 EUR
- 11 Roland Berger: Moderne bildgebende Verfahren der medizinischen Diagnostik. *Ein Weg zu interessanterem Physikunterricht*
ISBN 978-3-89722-445-2 40.50 EUR

- 12 Johannes Werner: Vom Licht zum Atom. *Ein Unterrichtskonzept zur Quantenphysik unter Nutzung des Zeigermodells*
ISBN 978-3-89722-471-1 40.50 EUR
- 13 Florian Sander: Verbindung von Theorie und Experiment im physikalischen Praktikum. *Eine empirische Untersuchung zum handlungsbezogenen Vorverständnis und dem Einsatz grafikorientierter Modellbildung im Praktikum*
ISBN 978-3-89722-482-7 40.50 EUR
- 14 Jörn Gerdes: Der Begriff der physikalischen Kompetenz. *Zur Validierung eines Konstruktes*
ISBN 978-3-89722-510-7 40.50 EUR
- 15 Malte Meyer-Arndt: Interaktionen im Physikpraktikum zwischen Studierenden und Betreuern. *Feldstudie zu Bedeutungsentwicklungsprozessen im physikalischen Praktikum*
ISBN 978-3-89722-541-1 40.50 EUR
- 16 Dietmar Höttecke: Die Natur der Naturwissenschaften historisch verstehen. *Fachdidaktische und wissenschaftshistorische Untersuchungen*
ISBN 978-3-89722-607-4 40.50 EUR
- 17 Gil Gabriel Mavanga: Entwicklung und Evaluation eines experimentell- und phänomenorientierten Optikcurriculums. *Untersuchung zu Schülervorstellungen in der Sekundarstufe I in Mosambik und Deutschland*
ISBN 978-3-89722-721-7 40.50 EUR
- 18 Meike Ute Zastrow: Interaktive Experimentieranleitungen. *Entwicklung und Evaluation eines Konzeptes zur Vorbereitung auf das Experimentieren mit Messgeräten im Physikalischen Praktikum*
ISBN 978-3-89722-802-3 40.50 EUR
- 19 Gunnar Friege: Wissen und Problemlösen. *Eine empirische Untersuchung des wissenszentrierten Problemlösens im Gebiet der Elektrizitätslehre auf der Grundlage des Experten-Novizen-Vergleichs*
ISBN 978-3-89722-809-2 40.50 EUR
- 20 Erich Starauschek: Physikunterricht nach dem Karlsruher Physikkurs. *Ergebnisse einer Evaluationsstudie*
ISBN 978-3-89722-823-8 40.50 EUR
- 21 Roland Paatz: Charakteristika analogiebasierten Denkens. *Vergleich von Lernprozessen in Basis- und Zielbereich*
ISBN 978-3-89722-944-0 40.50 EUR
- 22 Silke Mikelskis-Seifert: Die Entwicklung von Metakzepten zur Teilchenvorstellung bei Schülern. *Untersuchung eines Unterrichts über Modelle mithilfe eines Systems multipler Repräsentationsebenen*
ISBN 978-3-8325-0013-9 40.50 EUR
- 23 Brunhild Landwehr: Distanzen von Lehrkräften und Studierenden des Sachunterrichts zur Physik. *Eine qualitativ-empirische Studie zu den Ursachen*
ISBN 978-3-8325-0044-3 40.50 EUR

- 24 Lydia Murmann: Physiklernen zu Licht, Schatten und Sehen. *Eine phänomenografische Untersuchung in der Primarstufe*
ISBN 978-3-8325-0060-3 40.50 EUR
- 25 Thorsten Bell: Strukturprinzipien der Selbstregulation. *Komplexe Systeme, Elementarisierungen und Lernprozessstudien für den Unterricht der Sekundarstufe II*
ISBN 978-3-8325-0134-1 40.50 EUR
- 26 Rainer Müller: Quantenphysik in der Schule
ISBN 978-3-8325-0186-0 40.50 EUR
- 27 Jutta Roth: Bedeutungsentwicklungsprozesse von Physikerinnen und Physikern in den Dimensionen Komplexität, Zeit und Inhalt
ISBN 978-3-8325-0183-9 40.50 EUR
- 28 Andreas Saniter: Spezifika der Verhaltensmuster fortgeschrittener Studierender der Physik
ISBN 978-3-8325-0292-8 40.50 EUR
- 29 Thomas Weber: Kumulatives Lernen im Physikunterricht. *Eine vergleichende Untersuchung in Unterrichtsgängen zur geometrischen Optik*
ISBN 978-3-8325-0316-1 40.50 EUR
- 30 Markus Rehm: Über die Chancen und Grenzen moralischer Erziehung im naturwissenschaftlichen Unterricht
ISBN 978-3-8325-0368-0 40.50 EUR
- 31 Marion Budde: Lernwirkungen in der Quanten-Atom-Physik. *Fallstudien über Resonanzen zwischen Lernangeboten und SchülerInnen-Vorstellungen*
ISBN 978-3-8325-0483-0 40.50 EUR
- 32 Thomas Reyer: Oberflächenmerkmale und Tiefenstrukturen im Unterricht. *Exemplarische Analysen im Physikunterricht der gymnasialen Sekundarstufe*
ISBN 978-3-8325-0488-5 40.50 EUR
- 33 Christoph Thomas Müller: Subjektive Theorien und handlungsleitende Kognitionen von Lehrern als Determinanten schulischer Lehr-Lern-Prozesse im Physikunterricht
ISBN 978-3-8325-0543-1 40.50 EUR
- 34 Gabriela Jonas-Ahrend: Physiklehrervorstellungen zum Experiment im Physikunterricht
ISBN 978-3-8325-0576-9 40.50 EUR
- 35 Dimitrios Stavrou: Das Zusammenspiel von Zufall und Gesetzmäßigkeiten in der nicht-linearen Dynamik. *Didaktische Analyse und Lernprozesse*
ISBN 978-3-8325-0609-4 40.50 EUR
- 36 Katrin Engeln: Schülerlabors: authentische, aktivierende Lernumgebungen als Möglichkeit, Interesse an Naturwissenschaften und Technik zu wecken
ISBN 978-3-8325-0689-6 40.50 EUR
- 37 Susann Hartmann: Erklärungsvielfalt
ISBN 978-3-8325-0730-5 40.50 EUR

- 38 Knut Neumann: Didaktische Rekonstruktion eines physikalischen Praktikums für Physiker
ISBN 978-3-8325-0762-6 40.50 EUR
- 39 Michael Späth: Kontextbedingungen für Physikunterricht an der Hauptschule. *Möglichkeiten und Ansatzpunkte für einen fachübergreifenden, handlungsorientierten und berufsorientierten Unterricht*
ISBN 978-3-8325-0827-2 40.50 EUR
- 40 Jörg Hirsch: Interesse, Handlungen und situatives Erleben von Schülerinnen und Schülern beim Bearbeiten physikalischer Aufgaben
ISBN 978-3-8325-0875-3 40.50 EUR
- 41 Monika Hüther: Evaluation einer hypermedialen Lernumgebung zum Thema Gasgesetze. *Eine Studie im Rahmen des Physikpraktikums für Studierende der Medizin*
ISBN 978-3-8325-0911-8 40.50 EUR
- 42 Maike Tesch: Das Experiment im Physikunterricht. *Didaktische Konzepte und Ergebnisse einer Videostudie*
ISBN 978-3-8325-0975-0 40.50 EUR
- 43 Nina Nicolai: Skriptgeleitete Eltern-Kind-Interaktion bei Chemiehausaufgaben. *Eine Evaluationsstudie im Themenbereich Säure-Base*
ISBN 978-3-8325-1013-8 40.50 EUR
- 44 Antje Leisner: Entwicklung von Modellkompetenz im Physikunterricht
ISBN 978-3-8325-1020-6 40.50 EUR
- 45 Stefan Rumann: Evaluation einer Interventionsstudie zur Säure-Base-Thematik
ISBN 978-3-8325-1027-5 40.50 EUR
- 46 Thomas Wilhelm: Konzeption und Evaluation eines Kinematik/Dynamik-Lehrgangs zur Veränderung von Schülervorstellungen mit Hilfe dynamisch ikonischer Repräsentationen und graphischer Modellbildung – mit CD-ROM
ISBN 978-3-8325-1046-6 45.50 EUR
- 47 Andrea Maier-Richter: Computerunterstütztes Lernen mit Lösungsbeispielen in der Chemie. *Eine Evaluationsstudie im Themenbereich Löslichkeit*
ISBN 978-3-8325-1046-6 40.50 EUR
- 48 Jochen Peuckert: Stabilität und Ausprägung kognitiver Strukturen zum Atombegriff
ISBN 978-3-8325-1104-3 40.50 EUR
- 49 Maik Walpuski: Optimierung von experimenteller Kleingruppenarbeit durch Strukturierungshilfen und Feedback
ISBN 978-3-8325-1184-5 40.50 EUR
- 50 Helmut Fischler, Christiane S. Reiners (Hrsg.): Die Teilchenstruktur der Materie im Physik- und Chemieunterricht
ISBN 978-3-8325-1225-5 34.90 EUR
- 51 Claudia Eysel: Interdisziplinäres Lehren und Lernen in der Lehrerbildung. *Eine empirische Studie zum Kompetenzerwerb in einer komplexen Lernumgebung*
ISBN 978-3-8325-1238-5 40.50 EUR

- 52 Johannes Günther: Lehrerfortbildung über die Natur der Naturwissenschaften. *Studien über das Wissenschaftsverständnis von Grundschullehrkräften*
ISBN 978-3-8325-1287-3 40.50 EUR
- 53 Christoph Neugebauer: Lernen mit Simulationen und der Einfluss auf das Problemlösen in der Physik
ISBN 978-3-8325-1300-9 40.50 EUR
- 54 Andreas Schnirch: Gendergerechte Interessen- und Motivationsförderung im Kontext naturwissenschaftlicher Grundbildung. *Konzeption, Entwicklung und Evaluation einer multimedial unterstützten Lernumgebung*
ISBN 978-3-8325-1334-4 40.50 EUR
- 55 Hilde Köster: Freies Explorieren und Experimentieren. *Eine Untersuchung zur selbstbestimmten Gewinnung von Erfahrungen mit physikalischen Phänomenen im Sachunterricht*
ISBN 978-3-8325-1348-1 40.50 EUR
- 56 Eva Heran-Dörr: Entwicklung und Evaluation einer Lehrerfortbildung zur Förderung der physikdidaktischen Kompetenz von Sachunterrichtslehrkräften
ISBN 978-3-8325-1377-1 40.50 EUR
- 57 Agnes Szabone Varnai: Unterstützung des Problemlösens in Physik durch den Einsatz von Simulationen und die Vorgabe eines strukturierten Kooperationsformats
ISBN 978-3-8325-1403-7 40.50 EUR
- 58 Johannes Rethfeld: Aufgabenbasierte Lernprozesse in selbstorganisationsoffenem Unterricht der Sekundarstufe I zum Themengebiet ELEKTROSTATIK. *Eine Feldstudie in vier 10. Klassen zu einer kartenbasierten Lernumgebung mit Aufgaben aus der Elektrostatik*
ISBN 978-3-8325-1416-7 40.50 EUR
- 59 Christian Henke: Experimentell-naturwissenschaftliche Arbeitsweisen in der Oberstufe. *Untersuchung am Beispiel des HIGHSEA-Projekts in Bremerhaven*
ISBN 978-3-8325-1515-7 40.50 EUR
- 60 Lutz Kasper: Diskursiv-narrative Elemente für den Physikunterricht. *Entwicklung und Evaluation einer multimedialen Lernumgebung zum Erdmagnetismus*
ISBN 978-3-8325-1537-9 40.50 EUR
- 61 Thorid Rabe: Textgestaltung und Aufforderung zu Selbsterklärungen beim Physiklernen mit Multimedia
ISBN 978-3-8325-1539-3 40.50 EUR
- 62 Ina Glemnitz: Vertikale Vernetzung im Chemieunterricht. *Ein Vergleich von traditionellem Unterricht mit Unterricht nach Chemie im Kontext*
ISBN 978-3-8325-1628-4 40.50 EUR
- 63 Erik Einhaus: Schülerkompetenzen im Bereich Wärmelehre. *Entwicklung eines Testinstruments zur Überprüfung und Weiterentwicklung eines normativen Modells fachbezogener Kompetenzen*
ISBN 978-3-8325-1630-7 40.50 EUR

- 64 Jasmin Neuroth: Concept Mapping als Lernstrategie. *Eine Interventionsstudie zum Chemielernen aus Texten*
ISBN 978-3-8325-1659-8 40.50 EUR
- 65 Hans Gerd Hegeler-Burkhart: Zur Kommunikation von Hauptschülerinnen und Hauptschülern in einem handlungsorientierten und fächerübergreifenden Unterricht mit physikalischen und technischen Inhalten
ISBN 978-3-8325-1667-3 40.50 EUR
- 66 Karsten Rincke: Sprachentwicklung und Fachlernen im Mechanikunterricht. *Sprache und Kommunikation bei der Einführung in den Kraftbegriff*
ISBN 978-3-8325-1699-4 40.50 EUR
- 67 Nina Strehle: Das Ion im Chemieunterricht. *Alternative Schülervorstellungen und curriculare Konsequenzen*
ISBN 978-3-8325-1710-6 40.50 EUR
- 68 Martin Hopf: Problemorientierte Schülerexperimente
ISBN 978-3-8325-1711-3 40.50 EUR
- 69 Anne Beerenwinkel: Fostering conceptual change in chemistry classes using expository texts
ISBN 978-3-8325-1721-2 40.50 EUR
- 70 Roland Berger: Das Gruppenpuzzle im Physikunterricht der Sekundarstufe II. *Eine empirische Untersuchung auf der Grundlage der Selbstbestimmungstheorie der Motivation*
ISBN 978-3-8325-1732-8 40.50 EUR
- 71 Giuseppe Colicchia: Physikunterricht im Kontext von Medizin und Biologie. *Entwicklung und Erprobung von Unterrichtseinheiten*
ISBN 978-3-8325-1746-5 40.50 EUR
- 72 Sandra Winheller: Geschlechtsspezifische Auswirkungen der Lehrer-Schüler-Interaktion im Chemieanfangsunterricht
ISBN 978-3-8325-1757-1 40.50 EUR
- 73 Isabel Wahser: Training von naturwissenschaftlichen Arbeitsweisen zur Unterstützung experimenteller Kleingruppenarbeit im Fach Chemie
ISBN 978-3-8325-1815-8 40.50 EUR
- 74 Claus Brell: Lernmedien und Lernerfolg - reale und virtuelle Materialien im Physikunterricht. *Empirische Untersuchungen in achten Klassen an Gymnasien (Laborstudie) zum Computereinsatz mit Simulation und IBE*
ISBN 978-3-8325-1829-5 40.50 EUR
- 75 Rainer Wackermann: Überprüfung der Wirksamkeit eines Basismodell-Trainings für Physiklehrer
ISBN 978-3-8325-1882-0 40.50 EUR
- 76 Oliver Tepner: Effektivität von Aufgaben im Chemieunterricht der Sekundarstufe I
ISBN 978-3-8325-1919-3 40.50 EUR

- 77 Claudia Geyer: Museums- und Science-Center-Besuche im naturwissenschaftlichen Unterricht aus einer motivationalen Perspektive. *Die Sicht von Lehrkräften und Schülerinnen und Schülern*
ISBN 978-3-8325-1922-3 40.50 EUR
- 78 Tobias Leonhard: Professionalisierung in der Lehrerbildung. *Eine explorative Studie zur Entwicklung professioneller Kompetenzen in der Lehrererstausbildung*
ISBN 978-3-8325-1924-7 40.50 EUR
- 79 Alexander Kauertz: Schwierigkeitserzeugende Merkmale physikalischer Leistungstestaufgaben
ISBN 978-3-8325-1925-4 40.50 EUR
- 80 Regina Hübinger: Schüler auf Weltreise. *Entwicklung und Evaluation von Lehr-/Lernmaterialien zur Förderung experimentell-naturwissenschaftlicher Kompetenzen für die Jahrgangsstufen 5 und 6*
ISBN 978-3-8325-1932-2 40.50 EUR
- 81 Christine Waltner: Physik lernen im Deutschen Museum
ISBN 978-3-8325-1933-9 40.50 EUR
- 82 Torsten Fischer: Handlungsmuster von Physiklehrkräften beim Einsatz neuer Medien. *Fallstudien zur Unterrichtspraxis*
ISBN 978-3-8325-1948-3 42.00 EUR
- 83 Corinna Kieren: Chemiehausaufgaben in der Sekundarstufe I des Gymnasiums. *Fragebogenerhebung zur gegenwärtigen Praxis und Entwicklung eines optimierten Hausaufgabendesigns im Themenbereich Säure-Base*
978-3-8325-1975-9 37.00 EUR
- 84 Marco Thiele: Modelle der Thermohalinen Zirkulation im Unterricht. *Eine empirische Studie zur Förderung des Modellverständnisses*
ISBN 978-3-8325-1982-7 40.50 EUR
- 85 Bernd Zinn: Physik lernen, um Physik zu lehren. *Eine Möglichkeit für interessanteren Physikunterricht*
ISBN 978-3-8325-1995-7 39.50 EUR
- 86 Esther Klaes: Außerschulische Lernorte im naturwissenschaftlichen Unterricht. *Die Perspektive der Lehrkraft*
ISBN 978-3-8325-2006-9 43.00 EUR
- 87 Marita Schmidt: Kompetenzmodellierung und -diagnostik im Themengebiet Energie der Sekundarstufe I. *Entwicklung und Erprobung eines Testinventars*
ISBN 978-3-8325-2024-3 37.00 EUR
- 88 Gudrun Franke-Braun: Aufgaben mit gestuften Lernhilfen. *Ein Aufgabenformat zur Förderung der sachbezogenen Kommunikation und Lernleistung für den naturwissenschaftlichen Unterricht*
ISBN 978-3-8325-2026-7 38.00 EUR
- 89 Silke Klos: Kompetenzförderung im naturwissenschaftlichen Anfangsunterricht. *Der Einfluss eines integrierten Unterrichtskonzepts*
ISBN 978-3-8325-2133-2 37.00 EUR

- 90 Ulrike Elisabeth Burkard: Quantenphysik in der Schule. *Bestandsaufnahme, Perspektiven und Weiterentwicklungsmöglichkeiten durch die Implementation eines Medienservers*
ISBN 978-3-8325-2215-5 43.00 EUR
- 91 Ulrike Gromadecki: Argumente in physikalischen Kontexten. *Welche Geltungsgründe halten Physikanfänger für überzeugend?*
ISBN 978-3-8325-2250-6 41.50 EUR
- 92 Jürgen Bruns: Auf dem Weg zur Förderung naturwissenschaftsspezifischer Vorstellungen von zukünftigen Chemie-Lehrenden
ISBN 978-3-8325-2257-5 43.50 EUR
- 93 Cornelius Marsch: Räumliche Atomvorstellung. *Entwicklung und Erprobung eines Unterrichtskonzeptes mit Hilfe des Computers*
ISBN 978-3-8325-2293-3 82.50 EUR
- 94 Maja Brückmann: Sachstrukturen im Physikunterricht. *Ergebnisse einer Videostudie*
ISBN 978-3-8325-2272-8 39.50 EUR
- 95 Sabine Fechner: Effects of Context-oriented Learning on Student Interest and Achievement in Chemistry Education
ISBN 978-3-8325-2343-5 36.50 EUR
- 96 Clemens Nagel: eLearning im Physikalischen Anfängerpraktikum
ISBN 978-3-8325-2355-8 39.50 EUR
- 97 Josef Riese: Professionelles Wissen und professionelle Handlungskompetenz von (angehenden) Physiklehrkräften
ISBN 978-3-8325-2376-3 39.00 EUR
- 98 Sascha Bernholt: Kompetenzmodellierung in der Chemie. *Theoretische und empirische Reflexion am Beispiel des Modells hierarchischer Komplexität*
ISBN 978-3-8325-2447-0 40.00 EUR
- 99 Holger Christoph Stawitz: Auswirkung unterschiedlicher Aufgabenprofile auf die Schülerleistung. *Vergleich von Naturwissenschafts- und Problemlöseaufgaben der PISA 2003-Studie*
ISBN 978-3-8325-2451-7 37.50 EUR
- 100 Hans Ernst Fischer, Elke Sumfleth (Hrsg.): nwu-essen – 10 Jahre Essener Forschung zum naturwissenschaftlichen Unterricht
ISBN 978-3-8325-3331-1 40.00 EUR
- 101 Hendrik Härtig: Sachstrukturen von Physikschulbüchern als Grundlage zur Bestimmung der Inhaltsvalidität eines Tests
ISBN 978-3-8325-2512-5 34.00 EUR
- 102 Thomas Grüß-Niehaus: Zum Verständnis des Löslichkeitskonzeptes im Chemieunterricht. *Der Effekt von Methoden progressiver und kollaborativer Reflexion*
ISBN 978-3-8325-2537-8 40.50 EUR

- 103 Patrick Bronner: Quantenoptische Experimente als Grundlage eines Curriculums zur Quantenphysik des Photons
ISBN 978-3-8325-2540-8 36.00 EUR
- 104 Adrian Voßkühler: Blickbewegungsmessung an Versuchsaufbauten. *Studien zur Wahrnehmung, Verarbeitung und Usability von physikbezogenen Experimenten am Bildschirm und in der Realität*
ISBN 978-3-8325-2548-4 47.50 EUR
- 105 Verena Tobias: Newton'sche Mechanik im Anfangsunterricht. *Die Wirksamkeit einer Einführung über die zweidimensionale Dynamik auf das Lehren und Lernen*
ISBN 978-3-8325-2558-3 54.00 EUR
- 106 Christian Rogge: Entwicklung physikalischer Konzepte in aufgabenbasierten Lernumgebungen
ISBN 978-3-8325-2574-3 45.00 EUR
- 107 Mathias Ropohl: Modellierung von Schülerkompetenzen im Basiskonzept Chemische Reaktion. *Entwicklung und Analyse von Testaufgaben*
ISBN 978-3-8325-2609-2 36.50 EUR
- 108 Christoph Kulgemeyer: Physikalische Kommunikationskompetenz. *Modellierung und Diagnostik*
ISBN 978-3-8325-2674-0 44.50 EUR
- 109 Jennifer Olszewski: The Impact of Physics Teachers' Pedagogical Content Knowledge on Teacher Actions and Student Outcomes
ISBN 978-3-8325-2680-1 33.50 EUR
- 110 Annika Ohle: Primary School Teachers' Content Knowledge in Physics and its Impact on Teaching and Students' Achievement
ISBN 978-3-8325-2684-9 36.50 EUR
- 111 Susanne Mannel: Assessing scientific inquiry. *Development and evaluation of a test for the low-performing stage*
ISBN 978-3-8325-2761-7 40.00 EUR
- 112 Michael Plomer: Physik physiologisch passend praktiziert. *Eine Studie zur Lernwirksamkeit von traditionellen und adressatenspezifischen Physikpraktika für die Physiologie*
ISBN 978-3-8325-2804-1 34.50 EUR
- 113 Alexandra Schulz: Experimentierspezifische Qualitätsmerkmale im Chemieunterricht. *Eine Videostudie*
ISBN 978-3-8325-2817-1 40.00 EUR
- 114 Franz Boczianowski: Eine empirische Untersuchung zu Vektoren im Physikunterricht der Mittelstufe
ISBN 978-3-8325-2843-0 39.50 EUR
- 115 Maria Ploog: Internetbasiertes Lernen durch Textproduktion im Fach Physik
ISBN 978-3-8325-2853-9 39.50 EUR

- 116 Anja Dhein: Lernen in Explorier- und Experimentiersituationen. *Eine explorative Studie zu Bedeutungsentwicklungsprozessen bei Kindern im Alter zwischen 4 und 6 Jahren*
ISBN 978-3-8325-2859-1 45.50 EUR
- 117 Irene Neumann: Beyond Physics Content Knowledge. *Modeling Competence Regarding Nature of Scientific Inquiry and Nature of Scientific Knowledge*
ISBN 978-3-8325-2880-5 37.00 EUR
- 118 Markus Emden: Prozessorientierte Leistungsmessung des naturwissenschaftlich-experimentellen Arbeitens. *Eine vergleichende Studie zu Diagnoseinstrumenten zu Beginn der Sekundarstufe I*
ISBN 978-3-8325-2867-6 38.00 EUR
- 119 Birgit Hofmann: Analyse von Blickbewegungen von Schülern beim Lesen von physikbezogenen Texten mit Bildern. *Eye Tracking als Methodenwerkzeug in der physikdidaktischen Forschung*
ISBN 978-3-8325-2925-3 59.00 EUR
- 120 Rebecca Knobloch: Analyse der fachinhaltlichen Qualität von Schüleräußerungen und deren Einfluss auf den Lernerfolg. *Eine Videostudie zu kooperativer Kleingruppenarbeit*
ISBN 978-3-8325-3006-8 36.50 EUR
- 121 Julia Hostenbach: Entwicklung und Prüfung eines Modells zur Beschreibung der Bewertungskompetenz im Chemieunterricht
ISBN 978-3-8325-3013-6 38.00 EUR
- 122 Anna Windt: Naturwissenschaftliches Experimentieren im Elementarbereich. *Evaluation verschiedener Lernsituationen*
ISBN 978-3-8325-3020-4 43.50 EUR
- 123 Eva Kölbach: Kontexteinflüsse beim Lernen mit Lösungsbeispielen
ISBN 978-3-8325-3025-9 38.50 EUR
- 124 Anna Lau: Passung und vertikale Vernetzung im Chemie- und Physikunterricht
ISBN 978-3-8325-3021-1 36.00 EUR
- 125 Jan Lamprecht: Ausbildungswege und Komponenten professioneller Handlungskompetenz. *Vergleich von Quereinsteigern mit Lehramtsabsolventen für Gymnasien im Fach Physik*
ISBN 978-3-8325-3035-8 38.50 EUR
- 126 Ulrike Böhm: Förderung von Verstehensprozessen unter Einsatz von Modellen
ISBN 978-3-8325-3042-6 41.00 EUR
- 127 Sabrina Dollny: Entwicklung und Evaluation eines Testinstruments zur Erfassung des fachspezifischen Professionswissens von Chemielehrkräften
ISBN 978-3-8325-3046-4 37.00 EUR
- 128 Monika Zimmermann: Naturwissenschaftliche Bildung im Kindergarten. *Eine integrative Längsschnittstudie zur Kompetenzentwicklung von Erzieherinnen*
ISBN 978-3-8325-3053-2 54.00 EUR

- 129 Ulf Saballus: Über das Schlussfolgern von Schülerinnen und Schülern zu öffentlichen Kontroversen mit naturwissenschaftlichem Hintergrund. *Eine Fallstudie*
ISBN 978-3-8325-3086-0 39.50 EUR
- 130 Olaf Krey: Zur Rolle der Mathematik in der Physik. *Wissenschaftstheoretische Aspekte und Vorstellungen Physiklernender*
ISBN 978-3-8325-3101-0 46.00 EUR
- 131 Angelika Wolf: Zusammenhänge zwischen der Eigenständigkeit im Physikunterricht, der Motivation, den Grundbedürfnissen und dem Lernerfolg von Schülern
ISBN 978-3-8325-3161-4 45.00 EUR
- 132 Johannes Börlin: Das Experiment als Lerngelegenheit. *Vom interkulturellen Vergleich des Physikunterrichts zu Merkmalen seiner Qualität*
ISBN 978-3-8325-3170-6 45.00 EUR
- 133 Olaf Uhden: Mathematisches Denken im Physikunterricht. *Theorieentwicklung und Problemanalyse*
ISBN 978-3-8325-3170-6 45.00 EUR
- 134 Christoph Gut: Modellierung und Messung experimenteller Kompetenz. *Analyse eines large-scale Experimentiertests*
ISBN 978-3-8325-3213-0 40.00 EUR
- 135 Antonio Rueda: Lernen mit ExploMultimedial in kolumbianischen Schulen. *Analyse von kurzzeitigen Lernprozessen und der Motivation beim länderübergreifenden Einsatz einer deutschen computergestützten multimedialen Lernumgebung für den naturwissenschaftlichen Unterricht*
ISBN 978-3-8325-3218-5 45.50 EUR
- 136 Krisztina Berger: Bilder, Animationen und Notizen. *Empirische Untersuchung zur Wirkung einfacher visueller Repräsentationen und Notizen auf den Wissenserwerb in der Optik*
ISBN 978-3-8325-3238-3 41.50 EUR
- 137 Antony Crossley: Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher physikalischer Konzepte auf den Wissenserwerb in der Thermodynamik der Sekundarstufe I
ISBN 978-3-8325-3275-8 40.00 EUR
- 138 Tobias Viering: Entwicklung physikalischer Kompetenz in der Sekundarstufe I. *Validierung eines Kompetenzentwicklungsmodells für das Energiekonzept im Bereich Fachwissen*
ISBN 978-3-8325-3277-2 37.00 EUR
- 139 Nico Schreiber: Diagnostik experimenteller Kompetenz. *Validierung technologiegestützter Testverfahren im Rahmen eines Kompetenzstrukturmodells*
ISBN 978-3-8325-3284-0 39.00 EUR
- 140 Sarah Hundertmark: Einblicke in kollaborative Lernprozesse. *Eine Fallstudie zur reflektierenden Zusammenarbeit unterstützt durch die Methoden Concept Mapping und Lernbegleitbogen*
ISBN 978-3-8325-3251-2 43.00 EUR

- 141 Ronny Scherer: Analyse der Struktur, Messinvarianz und Ausprägung komplexer Problemlösekompetenz im Fach Chemie. *Eine Querschnittstudie in der Sekundarstufe I und am Übergang zur Sekundarstufe II*
ISBN 978-3-8325-3312-0 43.00 EUR
- 142 Patricia Heitmann: Bewertungskompetenz im Rahmen naturwissenschaftlicher Problemlöseprozesse. *Modellierung und Diagnose der Kompetenzen Bewertung und analytisches Problemlösen für das Fach Chemie*
ISBN 978-3-8325-3314-4 37.00 EUR
- 143 Jan Fleischhauer: Wissenschaftliches Argumentieren und Entwicklung von Konzepten beim Lernen von Physik
ISBN 978-3-8325-3325-0 35.00 EUR
- 144 Nermin Özcan: Zum Einfluss der Fachsprache auf die Leistung im Fach Chemie. *Eine Förderstudie zur Fachsprache im Chemieunterricht*
ISBN 978-3-8325-3328-1 36.50 EUR
- 145 Helena van Vorst: Kontextmerkmale und ihr Einfluss auf das Schülerinteresse im Fach Chemie
ISBN 978-3-8325-3321-2 38.50 EUR
- 146 Janine Cappell: Fachspezifische Diagnosekompetenz angehender Physiklehrkräfte in der ersten Ausbildungsphase
ISBN 978-3-8325-3356-4 38.50 EUR
- 147 Susanne Bley: Förderung von Transferprozessen im Chemieunterricht
ISBN 978-3-8325-3407-3 40.50 EUR
- 148 Cathrin Blaes: Die übungsgestützte Lehrerpräsentation im Chemieunterricht der Sekundarstufe I. *Evaluation der Effektivität*
ISBN 978-3-8325-3409-7 43.50 EUR
- 149 Julia Suckut: Die Wirksamkeit von piko-OWL als Lehrerfortbildung. Eine Evaluation zum Projekt *Physik im Kontext* in Fallstudien
ISBN 978-3-8325-3440-0 45.00 EUR
- 150 Alexandra Dorschu: Die Wirkung von Kontexten in Physikkompetenztestaufgaben
ISBN 978-3-8325-3446-2 37.00 EUR
- 151 Jochen Scheid: Multiple Repräsentationen, Verständnis physikalischer Experimente und kognitive Aktivierung: *Ein Beitrag zur Entwicklung der Aufgabenkultur*
ISBN 978-3-8325-3449-3 49.00 EUR
- 152 Tim Plasa: Die Wahrnehmung von Schülerlaboren und Schülerforschungszentren
ISBN 978-3-8325-3483-7 35.50 EUR
- 153 Felix Schoppmeier: Physikkompetenz in der gymnasialen Oberstufe. *Entwicklung und Validierung eines Kompetenzstrukturmodells für den Kompetenzbereich Umgang mit Fachwissen*
ISBN 978-3-8325-3502-5 36.00 EUR

- 154 Katharina Groß: Experimente alternativ dokumentieren. *Eine qualitative Studie zur Förderung der Diagnose- und Differenzierungskompetenz in der Chemielehrerbildung*
ISBN 978-3-8325-3508-7 43.50 EUR
- 155 Barbara Hank: Konzeptwandelprozesse im Anfangsunterricht Chemie. *Eine quasixperimentelle Längsschnittstudie*
ISBN 978-3-8325-3519-3 38.50 EUR
- 156 Katja Freyer: Zum Einfluss von Studieneingangsvoraussetzungen auf den Studienerfolg Erstsemesterstudierender im Fach Chemie
ISBN 978-3-8325-3544-5 38.00 EUR
- 157 Alexander Rachel: Auswirkungen instruktionaler Hilfen bei der Einführung des (Ferro-)Magnetismus. *Eine Vergleichsstudie in der Primar- und Sekundarstufe*
ISBN 978-3-8325-3548-3 43.50 EUR
- 158 Sebastian Ritter: Einfluss des Lerninhalts Nanogrößeneffekte auf Teilchen- und Teilchenmodellvorstellungen von Schülerinnen und Schülern
ISBN 978-3-8325-3558-2 36.00 EUR
- 159 Andrea Harbach: Problemorientierung und Vernetzung in kontextbasierten Lernaufgaben
ISBN 978-3-8325-3564-3 39.00 EUR
- 160 David Obst: Interaktive Tafeln im Physikunterricht. *Entwicklung und Evaluation einer Lehrerfortbildung*
ISBN 978-3-8325-3582-7 40.50 EUR
- 161 Sophie Kirschner: Modellierung und Analyse des Professionswissens von Physiklehrkräften
ISBN 978-3-8325-3601-5 35.00 EUR
- 162 Katja Stief: Selbstregulationsprozesse und Hausaufgabenmotivation im Chemieunterricht
ISBN 978-3-8325-3631-2 34.00 EUR
- 163 Nicola Meschede: Professionelle Wahrnehmung der inhaltlichen Strukturierung im naturwissenschaftlichen Grundschulunterricht. *Theoretische Beschreibung und empirische Erfassung*
ISBN 978-3-8325-3668-8 37.00 EUR
- 164 Johannes Maximilian Barth: Experimentieren im Physikunterricht der gymnasialen Oberstufe. *Eine Rekonstruktion übergeordneter Einbettungsstrategien*
ISBN 978-3-8325-3681-7 39.00 EUR
- 165 Sandra Lein: Das Betriebspraktikum in der Lehrerbildung. *Eine Untersuchung zur Förderung der Wissenschafts- und Technikbildung im allgemeinbildenden Unterricht*
ISBN 978-3-8325-3698-5 40.00 EUR
- 166 Veranika Maiseyenka: Modellbasiertes Experimentieren im Unterricht. *Praxistauglichkeit und Lernwirkungen*
ISBN 978-3-8325-3708-1 38.00 EUR

- 167 Christoph Stolzenberger: Der Einfluss der didaktischen Lernumgebung auf das Erreichen geforderter Bildungsziele am Beispiel der W- und P-Seminare im Fach Physik
ISBN 978-3-8325-3708-1 38.00 EUR
- 168 Pia Altenburger: Mehrebenenregressionsanalysen zum Physiklernen im Sachunterricht der Primarstufe. *Ergebnisse einer Evaluationsstudie.*
ISBN 978-3-8325-3717-3 37.50 EUR
- 169 Nora Ferber: Entwicklung und Validierung eines Testinstruments zur Erfassung von Kompetenzentwicklung im Fach Chemie in der Sekundarstufe I
ISBN 978-3-8325-3727-2 39.50 EUR
- 170 Anita Stender: Unterrichtsplanung: Vom Wissen zum Handeln.
Theoretische Entwicklung und empirische Überprüfung des Transformationsmodells der Unterrichtsplanung
ISBN 978-3-8325-3750-0 41.50 EUR
- 171 Jenna Koenen: Entwicklung und Evaluation von experimentunterstützten Lösungsbeispielen zur Förderung naturwissenschaftlich-experimenteller Arbeitsweisen
ISBN 978-3-8325-3785-2 43.00 EUR
- 172 Teresa Henning: Empirische Untersuchung kontextorientierter Lernumgebungen in der Hochschuldidaktik. *Entwicklung und Evaluation kontextorientierter Aufgaben in der Studieneingangsphase für Fach- und Nebenfachstudierende der Physik*
ISBN 978-3-8325-3801-9 43.00 EUR
- 173 Alexander Pusch: Fachspezifische Instrumente zur Diagnose und individuellen Förderung von Lehramtsstudierenden der Physik
ISBN 978-3-8325-3829-3 38.00 EUR
- 174 Christoph Vogelsang: Validierung eines Instruments zur Erfassung der professionellen Handlungskompetenz von (angehenden) Physiklehrkräften. *Zusammenhangsanalysen zwischen Lehrerkompetenz und Lehrerperformanz*
ISBN 978-3-8325-3846-0 50.50 EUR
- 175 Ingo Brebeck: Selbstreguliertes Lernen in der Studieneingangsphase im Fach Chemie
ISBN 978-3-8325-3859-0 37.00 EUR
- 176 Axel Eghtessad: Merkmale und Strukturen von Professionalisierungsprozessen in der ersten und zweiten Phase der Chemielehrerbildung. *Eine empirisch-qualitative Studie mit niedersächsischen Fachleiter_innen der Sekundarstufenlehrkräfte*
ISBN 978-3-8325-3861-3 45.00 EUR
- 177 Andreas Nehring: Wissenschaftliche Denk- und Arbeitsweisen im Fach Chemie. Eine kompetenzorientierte Modell- und Testentwicklung für den Bereich der Erkenntnisgewinnung
ISBN 978-3-8325-3872-9 39.50 EUR
- 178 Maike Schmidt: Professionswissen von Sachunterrichtslehrkräften. Zusammenhangsanalyse zur Wirkung von Ausbildungshintergrund und Unterrichtserfahrung auf das fachspezifische Professionswissen im Unterrichtsinhalt „Verbrennung“
ISBN 978-3-8325-3907-8 38.50 EUR

- 179 Jan Winkelmann: Auswirkungen auf den Fachwissenszuwachs und auf affektive Schülermerkmale durch Schüler- und Demonstrationsexperimente im Physikunterricht
ISBN 978-3-8325-3915-3 41.00 EUR
- 180 Iwen Kobow: Entwicklung und Validierung eines Testinstrumentes zur Erfassung der Kommunikationskompetenz im Fach Chemie
ISBN 978-3-8325-3927-6 34.50 EUR
- 181 Yvonne Gramzow: Fachdidaktisches Wissen von Lehramtsstudierenden im Fach Physik. Modellierung und Testkonstruktion
ISBN 978-3-8325-3931-3 42.50 EUR
- 182 Evelin Schröter: Entwicklung der Kompetenzerwartung durch Lösen physikalischer Aufgaben einer multimedialen Lernumgebung
ISBN 978-3-8325-3975-7 54.50 EUR
- 183 Inga Kallweit: Effektivität des Einsatzes von Selbsteinschätzungsbögen im Chemieunterricht der Sekundarstufe I. *Individuelle Förderung durch selbstreguliertes Lernen*
ISBN 978-3-8325-3965-8 44.00 EUR
- 184 Andrea Schumacher: Paving the way towards authentic chemistry teaching. *A contribution to teachers' professional development*
ISBN 978-3-8325-3976-4 48.50 EUR
- 185 David Woitkowski: Fachliches Wissen Physik in der Hochschulausbildung. *Konzeptualisierung, Messung, Niveaubildung*
ISBN 978-3-8325-3988-7 53.00 EUR
- 186 Marianne Korner: Cross-Age Peer Tutoring in Physik. *Evaluation einer Unterrichtsmethode*
ISBN 978-3-8325-3979-5 38.50 EUR
- 187 Simone Nakoinz: Untersuchung zur Verknüpfung submikroskopischer und makroskopischer Konzepte im Fach Chemie
ISBN 978-3-8325-4057-9 38.50 EUR
- 188 Sandra Anus: Evaluation individueller Förderung im Chemieunterricht. *Adaptivität von Lerninhalten an das Vorwissen von Lernenden am Beispiel des Basiskonzeptes Chemische Reaktion*
ISBN 978-3-8325-4059-3 43.50 EUR
- 189 Thomas Roßbegalle: Fachdidaktische Entwicklungsforschung zum besseren Verständnis atmosphärischer Phänomene. *Treibhauseffekt, saurer Regen und stratosphärischer Ozonabbau als Kontexte zur Vermittlung von Basiskonzepten der Chemie*
ISBN 978-3-8325-4059-3 45.50 EUR
- 190 Kathrin Steckenmesser-Sander: Gemeinsamkeiten und Unterschiede physikbezogener Handlungs-, Denk- und Lernprozesse von Mädchen und Jungen
ISBN 978-3-8325-4066-1 38.50 EUR
- 191 Cornelia Geller: Lernprozessorientierte Sequenzierung des Physikunterrichts im Zusammenhang mit Fachwissenserwerb. *Eine Videostudie in Finnland, Deutschland und der Schweiz*
ISBN 978-3-8325-4082-1 35.50 EUR

- 192 Jan Hofmann: Untersuchung des Kompetenzaufbaus von Physiklehrkräften während einer Fortbildungsmaßnahme
ISBN 978-3-8325-4104-0 38.50 EUR
- 193 Andreas Dickhäuser: Chemiespezifischer Humor. *Theoriebildung, Materialentwicklung, Evaluation*
ISBN 978-3-8325-4108-8 37.00 EUR
- 194 Stefan Korte: Die Grenzen der Naturwissenschaft als Thema des Physikunterrichts
ISBN 978-3-8325-4112-5 57.50 EUR
- 195 Carolin Hülsmann: Kurswahlmotive im Fach Chemie. Eine Studie zum Wahlverhalten und Erfolg von Schülerinnen und Schülern in der gymnasialen Oberstufe
ISBN 978-3-8325-4144-6 49.00 EUR
- 196 Caroline Körbs: Mindeststandards im Fach Chemie am Ende der Pflichtschulzeit
ISBN 978-3-8325-4148-4 34.00 EUR
- 197 Andreas Vorholzer: Wie lassen sich Kompetenzen des experimentellen Denkens und Arbeitens fördern? *Eine empirische Untersuchung der Wirkung eines expliziten und eines impliziten Instruktionsansatzes*
ISBN 978-3-8325-4194-1 37.50 EUR
- 198 Anna Katharina Schmitt: Entwicklung und Evaluation einer Chemielehrerfortbildung zum Kompetenzbereich Erkenntnisgewinnung
ISBN 978-3-8325-4228-3 39.50 EUR
- 199 Christian Maurer: Strukturierung von Lehr-Lern-Sequenzen
ISBN 978-3-8325-4247-4 36.50 EUR
- 200 Helmut Fischler, Elke Sumfleth (Hrsg.): Professionelle Kompetenz von Lehrkräften der Chemie und Physik
ISBN 978-3-8325-4523-9 34.00 EUR
- 201 Simon Zander: Lehrerfortbildung zu Basismodellen und Zusammenhänge zum Fachwissen
ISBN 978-3-8325-4248-1 35.00 EUR
- 202 Kerstin Arndt: Experimentierkompetenz erfassen.
Analyse von Prozessen und Mustern am Beispiel von Lehramtsstudierenden der Chemie
ISBN 978-3-8325-4266-5 45.00 EUR
- 203 Christian Lang: Kompetenzorientierung im Rahmen experimentalchemischer Praktika
ISBN 978-3-8325-4268-9 42.50 EUR
- 204 Eva Cauet: Testen wir relevantes Wissen? *Zusammenhang zwischen dem Professionswissen von Physiklehrkräften und gutem und erfolgreichem Unterrichten*
ISBN 978-3-8325-4276-4 39.50 EUR
- 205 Patrick Löffler: Modellanwendung in Problemlöseaufgaben. *Wie wirkt Kontext?*
ISBN 978-3-8325-4303-7 35.00 EUR

- 206 Carina Gehlen: Kompetenzstruktur naturwissenschaftlicher Erkenntnisgewinnung im Fach Chemie
ISBN 978-3-8325-4318-1 43.00 EUR
- 207 Lars Oettinghaus: Lehrerüberzeugungen und physikbezogenes Professionswissen. *Vergleich von Absolventinnen und Absolventen verschiedener Ausbildungswege im Physikreferendariat*
ISBN 978-3-8325-4319-8 38.50 EUR
- 208 Jennifer Petersen: Zum Einfluss des Merkmals Humor auf die Gesundheitsförderung im Chemieunterricht der Sekundarstufe I. *Eine Interventionsstudie zum Thema Sonnenschutz*
ISBN 978-3-8325-4348-8 40.00 EUR
- 209 Philipp Straube: Modellierung und Erfassung von Kompetenzen naturwissenschaftlicher Erkenntnisgewinnung bei (Lehramts-) Studierenden im Fach Physik
ISBN 978-3-8325-4351-8 35.50 EUR
- 210 Martin Dickmann: Messung von Experimentierfähigkeiten. *Validierungsstudien zur Qualität eines computerbasierten Testverfahrens*
ISBN 978-3-8325-4356-3 41.00 EUR
- 211 Markus Bohlmann: Science Education. Empirie, Kulturen und Mechanismen der Didaktik der Naturwissenschaften
ISBN 978-3-8325-4377-8 44.00 EUR
- 212 Martin Draude: Die Kompetenz von Physiklehrkräften, Schwierigkeiten von Schülerinnen und Schülern beim eigenständigen Experimentieren zu diagnostizieren
ISBN 978-3-8325-4382-2 37.50 EUR
- 213 Henning Rode: Prototypen evidenzbasierten Physikunterrichts. *Zwei empirische Studien zum Einsatz von Feedback und Blackboxes in der Sekundarstufe*
ISBN 978-3-8325-4389-1 42.00 EUR
- 214 Jan-Henrik Kechel: Schülerschwierigkeiten beim eigenständigen Experimentieren. *Eine qualitative Studie am Beispiel einer Experimentieraufgabe zum Hooke'schen Gesetz*
ISBN 978-3-8325-4392-1 55.00 EUR
- 215 Katharina Fricke: Classroom Management and its Impact on Lesson Outcomes in Physics. *A multi-perspective comparison of teaching practices in primary and secondary schools*
ISBN 978-3-8325-4394-5 40.00 EUR
- 216 Hannes Sander: Orientierungen von Jugendlichen beim Urteilen und Entscheiden in Kontexten nachhaltiger Entwicklung. *Eine rekonstruktive Perspektive auf Bewertungskompetenz in der Didaktik der Naturwissenschaft*
ISBN 978-3-8325-4434-8 46.00 EUR
- 217 Inka Haak: Maßnahmen zur Unterstützung kognitiver und metakognitiver Prozesse in der Studieneingangsphase. *Eine Design-Based-Research-Studie zum universitären Lernzentrum Physiktreff*
ISBN 978-3-8325-4437-9 46.50 EUR

- 218 Martina Brandenburger: Was beeinflusst den Erfolg beim Problemlösen in der Physik?
Eine Untersuchung mit Studierenden
ISBN 978-3-8325-4409-6 42.50 EUR
- 219 Corinna Helms: Entwicklung und Evaluation eines Trainings zur Verbesserung der Erklärqualität von Schülerinnen und Schülern im Gruppenpuzzle
ISBN 978-3-8325-4454-6 42.50 EUR
- 220 Viktoria Rath: Diagnostische Kompetenz von angehenden Physiklehrkräften. *Modellierung, Testinstrumentenentwicklung und Erhebung der Performanz bei der Diagnose von Schülervorstellungen in der Mechanik*
ISBN 978-3-8325-4456-0 42.50 EUR
- 221 Janne Krüger: Schülerperspektiven auf die zeitliche Entwicklung der Naturwissenschaften
ISBN 978-3-8325-4457-7 45.50 EUR
- 222 Stefan Mutke: Das Professionswissen von Chemiereferendarinnen und -referendaren in Nordrhein-Westfalen. *Eine Längsschnittstudie*
ISBN 978-3-8325-4458-4 37.50 EUR
- 223 Sebastian Habig: Systematisch variierte Kontextaufgaben und ihr Einfluss auf kognitive und affektive Schülerfaktoren
ISBN 978-3-8325-4467-6 40.50 EUR
- 224 Sven Liepertz: Zusammenhang zwischen dem Professionswissen von Physiklehrkräften, dem sachstrukturellen Angebot des Unterrichts und der Schülerleistung
ISBN 978-3-8325-4480-5 34.00 EUR
- 225 Elina Platova: Optimierung eines Laborpraktikums durch kognitive Aktivierung
ISBN 978-3-8325-4481-2 39.00 EUR
- 226 Tim Reschke: Lesegeschichten im Chemieunterricht der Sekundarstufe I zur Unterstützung von situationalem Interesse und Lernerfolg
ISBN 978-3-8325-4487-4 41.00 EUR
- 227 Lena Mareike Walper: Entwicklung der physikbezogenen Interessen und selbstbezogenen Kognitionen von Schülerinnen und Schülern in der Übergangsphase von der Primar- in die Sekundarstufe. *Eine Längsschnittanalyse vom vierten bis zum siebten Schuljahr*
ISBN 978-3-8325-4495-9 43.00 EUR
- 228 Stefan Anthofer: Förderung des fachspezifischen Professionswissens von Chemielehramtsstudierenden
ISBN 978-3-8325-4498-0 39.50 EUR
- 229 Marcel Bullinger: Handlungsorientiertes Physiklernen mit instruierten Selbsterklärungen in der Primarstufe. *Eine experimentelle Laborstudie*
ISBN 978-3-8325-4504-8 44.00 EUR
- 230 Thomas Amenda: Bedeutung fachlicher Elementarisierungen für das Verständnis der Kinematik
ISBN 978-3-8325-4531-4 43.50 EUR

- 231 Sabrina Milke: Beeinflusst *Priming* das Physiklernen?
Eine empirische Studie zum Dritten Newtonschen Axiom
ISBN 978-3-8325-4549-4 42.00 EUR
- 232 Corinna Erfmann: Ein anschaulicher Weg zum Verständnis der elektromagnetischen Induktion. *Evaluation eines Unterrichtsvorschlags und Validierung eines Leistungsdiagnoseinstruments*
ISBN 978-3-8325-4550-5 49.50 EUR
- 233 Hanne Rautenstrauch: Erhebung des (Fach-)Sprachstandes bei Lehramtsstudierenden im Kontext des Faches Chemie
ISBN 978-3-8325-4556-7 40.50 EUR
- 234 Tobias Klug: Wirkung kontextorientierter physikalischer Praktikumsversuche auf Lernprozesse von Studierenden der Medizin
ISBN 978-3-8325-4558-1 37.00 EUR
- 235 Mareike Bohrmann: Zur Förderung des Verständnisses der Variablenkontrolle im naturwissenschaftlichen Sachunterricht
ISBN 978-3-8325-4559-8 52.00 EUR
- 236 Anja Schödl: FALKO-Physik – Fachspezifische Lehrerkompetenzen im Fach Physik. *Entwicklung und Validierung eines Testinstruments zur Erfassung des fachspezifischen Professionswissens von Physiklehrkräften*
ISBN 978-3-8325-4553-6 40.50 EUR
- 237 Hilda Scheuermann: Entwicklung und Evaluation von Unterstützungsmaßnahmen zur Förderung der Variablenkontrollstrategie beim Planen von Experimenten
ISBN 978-3-8325-4568-0 39.00 EUR
- 238 Christian G. Strippel: Naturwissenschaftliche Erkenntnisgewinnung an chemischen Inhalten vermitteln. *Konzeption und empirische Untersuchung einer Ausstellung mit Experimentierstation*
ISBN 978-3-8325-4577-2 41.50 EUR
- 239 Sarah Rau: Durchführung von Sachunterricht im Vorbereitungsdienst. *Eine längsschnittliche, videobasierte Unterrichtsanalyse*
ISBN 978-3-8325-4579-6 46.00 EUR
- 240 Thomas Plotz: Lernprozesse zu nicht-sichtbarer Strahlung. *Empirische Untersuchungen in der Sekundarstufe 2*
ISBN 978-3-8325-4624-3 39.50 EUR
- 241 Wolfgang Aschauer: Elektrische und magnetische Felder. *Eine empirische Studie zu Lernprozessen in der Sekundarstufe II*
ISBN 978-3-8325-4625-0 50.00 EUR
- 242 Anna Donhauser: Didaktisch rekonstruierte Materialwissenschaft. *Aufbau und Konzeption eines Schülerlabors für den Exzellenzcluster Engineering of Advanced Materials*
ISBN 978-3-8325-4636-6 39.00 EUR

- 243 Katrin Schüßler: Lernen mit Lösungsbeispielen im Chemieunterricht. *Einflüsse auf Lernerfolg, kognitive Belastung und Motivation*
ISBN 978-3-8325-4640-3 42.50 EUR
- 244 Timo Fleischer: Untersuchung der chemischen Fachsprache unter besonderer Berücksichtigung chemischer Repräsentationen
ISBN 978-3-8325-4642-7 46.50 EUR
- 245 Rosina Steininger: Concept Cartoons als Stimuli für Kleingruppendiskussionen im Chemieunterricht. *Beschreibung und Analyse einer komplexen Lerngelegenheit*
ISBN 978-3-8325-4647-2 39.00 EUR
- 246 Daniel Rehfeldt: Erfassung der Lehrqualität naturwissenschaftlicher Experimentalpraktika
ISBN 978-3-8325-4590-1 40.00 EUR
- 247 Sandra Puddu: Implementing Inquiry-based Learning in a Diverse Classroom: Investigating Strategies of Scaffolding and Students' Views of Scientific Inquiry
ISBN 978-3-8325-4591-8 35.50 EUR
- 248 Markus Bliersbach: Kreativität in der Chemie. *Erhebung und Förderung der Vorstellungen von Chemielehramtsstudierenden*
ISBN 978-3-8325-4593-2 44.00 EUR
- 249 Lennart Kimpel: Aufgaben in der Allgemeinen Chemie. *Zum Zusammenspiel von chemischem Verständnis und Rechenfähigkeit*
ISBN 978-3-8325-4618-2 36.00 EUR
- 250 Louise Bindel: Effects of integrated learning: explicating a mathematical concept in inquiry-based science camps
ISBN 978-3-8325-4655-7 37.50 EUR
- 251 Michael Wenzel: Computereinsatz in Schule und Schülerlabor. *Einstellung von Physiklehrkräften zu Neuen Medien*
ISBN 978-3-8325-4659-5 38.50 EUR
- 252 Laura Muth: Einfluss der Auswertephase von Experimenten im Physikunterricht. *Ergebnisse einer Interventionsstudie zum Zuwachs von Fachwissen und experimenteller Kompetenz von Schülerinnen und Schülern*
ISBN 978-3-8325-4675-5 36.50 EUR
- 253 Annika Fricke: Interaktive Skripte im Physikalischen Praktikum. *Entwicklung und Evaluation von Hypermedien für die Nebenfachausbildung*
ISBN 978-3-8325-4676-2 41.00 EUR
- 254 Julia Haase: Selbstbestimmtes Lernen im naturwissenschaftlichen Sachunterricht. *Eine empirische Interventionsstudie mit Fokus auf Feedback und Kompetenzerleben*
ISBN 978-3-8325-4685-4 38.50 EUR
- 255 Antje J. Heine: Was ist Theoretische Physik? *Eine wissenschaftstheoretische Betrachtung und Rekonstruktion von Vorstellungen von Studierenden und Dozenten über das Wesen der Theoretischen Physik*
ISBN 978-3-8325-4691-5 46.50 EUR

- 256 Claudia Meinhardt: Entwicklung und Validierung eines Testinstruments zu Selbstwirksamkeitserwartungen von (angehenden) Physiklehrkräften in physikdidaktischen Handlungsfeldern
ISBN 978-3-8325-4712-7 47.00 EUR
- 257 Ann-Kathrin Schlüter: Professionalisierung angehender Chemielehrkräfte für einen Gemeinsamen Unterricht
ISBN 978-3-8325-4713-4 53.50 EUR
- 258 Stefan Richtberg: Elektronenbahnen in Feldern. Konzeption und Evaluation einer webbasierten Lernumgebung
ISBN 978-3-8325-4723-3 49.00 EUR
- 259 Jan-Philipp Burde: Konzeption und Evaluation eines Unterrichtskonzepts zu einfachen Stromkreisen auf Basis des Elektronengasmodells
ISBN 978-3-8325-4726-4 57.50 EUR
- 260 Frank Finkenberg: Flipped Classroom im Physikunterricht
ISBN 978-3-8325-4737-4 42.50 EUR
- 261 Florian Treisch: Die Entwicklung der Professionellen Unterrichtswahrnehmung im Lehr-Lern-Labor Seminar
ISBN 978-3-8325-4741-4 41.50 EUR
- 262 Desiree Mayr: Strukturiertheit des experimentellen naturwissenschaftlichen Problemlöseprozesses
ISBN 978-3-8325-4757-8 37.00 EUR
- 263 Katrin Weber: Entwicklung und Validierung einer Learning Progression für das Konzept der chemischen Reaktion in der Sekundarstufe I
ISBN 978-3-8325-4762-2 48.50 EUR
- 264 Hauke Bartels: Entwicklung und Bewertung eines performanznahen Videovignetten-tests zur Messung der Erklärfähigkeit von Physiklehrkräften
ISBN 978-3-8325-4804-9 37.00 EUR
- 265 Karl Marniok: Zum Wesen von Theorien und Gesetzen in der Chemie. *Begriffsanalyse und Förderung der Vorstellungen von Lehramtsstudierenden*
ISBN 978-3-8325-4805-6 42.00 EUR
- 266 Marisa Holzapfel: Fachspezifischer Humor als Methode in der Gesundheitsbildung im Übergang von der Primarstufe zur Sekundarstufe I
ISBN 978-3-8325-4808-7 50.00 EUR
- 267 Anna Stolz: Die Auswirkungen von Experimentiersituationen mit unterschiedlichem Öffnungsgrad auf Leistung und Motivation der Schülerinnen und Schüler
ISBN 978-3-8325-4781-3 38.00 EUR
- 268 Nina Ulrich: Interaktive Lernaufgaben in dem digitalen Schulbuch eChemBook. *Einfluss des Interaktivitätsgrads der Lernaufgaben und des Vorwissens der Lernenden auf den Lernerfolg*
ISBN 978-3-8325-4814-8 43.50 EUR

- 269 Kim-Alessandro Weber: Quantenoptik in der Lehrerfortbildung. *Ein bedarfsgeprägtes Fortbildungskonzept zum Quantenobjekt Photon mit Realexperimenten*
ISBN 978-3-8325-4792-9 55.00 EUR
- 270 Nina Skorsetz: Empathisierer und Systematisierer im Vorschulalter. *Eine Fragebogen- und Videostudie zur Motivation, sich mit Naturphänomenen zu beschäftigen*
ISBN 978-3-8325-4825-4 43.50 EUR
- 271 Franziska Kehne: Analyse des Transfers von kontextualisiert erworbenem Wissen im Fach Chemie
ISBN 978-3-8325-4846-9 45.00 EUR
- 272 Markus Elsholz: Das akademische Selbstkonzept angehender Physiklehrkräfte als Teil ihrer professionellen Identität. *Dimensionalität und Veränderung während einer zentralen Praxisphase*
ISBN 978-3-8325-4857-5 37.50 EUR
- 273 Joachim Müller: Studienerfolg in der Physik. *Zusammenhang zwischen Modellierungskompetenz und Studienerfolg*
ISBN 978-3-8325-4859-9 35.00 EUR
- 274 Jennifer Dörschelln: Organische Leuchtdioden. *Implementation eines innovativen Themas in den Chemieunterricht*
ISBN 978-3-8325-4865-0 59.00 EUR
- 275 Stephanie Strelow: Beliefs von Studienanfängern des Kombi-Bachelors Physik über die Natur der Naturwissenschaften
ISBN 978-3-8325-4881-0 40.50 EUR
- 276 Dennis Jaeger: Kognitive Belastung und aufgabenspezifische sowie personenspezifische Einflussfaktoren beim Lösen von Physikaufgaben
ISBN 978-3-8325-4928-2 50.50 EUR
- 277 Vanessa Fischer: Der Einfluss von Interesse und Motivation auf die Messung von Fach- und Bewertungskompetenz im Fach Chemie
ISBN 978-3-8325-4933-6 39.00 EUR
- 278 René Dohrmann: Professionsbezogene Wirkungen einer Lehr-Lern-Labor-Veranstaltung. *Eine multimethodische Studie zu den professionsbezogenen Wirkungen einer Lehr-Lern-Labor-Blockveranstaltung auf Studierende der Bachelorstudiengänge Lehramt Physik und Grundschulpädagogik (Sachunterricht)*
ISBN 978-3-8325-4958-9 40.00 EUR
- 279 Meike Bergs: Can We Make Them Use These Strategies? *Fostering Inquiry-Based Science Learning Skills with Physical and Virtual Experimentation Environments*
ISBN 978-3-8325-4962-6 39.50 EUR
- 280 Marie-Therese Hauerstein: Untersuchung zur Effektivität von Strukturierung und Binnendifferenzierung im Chemieunterricht der Sekundarstufe I. *Evaluation der Strukturierungshilfe Lernleiter*
ISBN 978-3-8325-4982-4 42.50 EUR

- 281 Verena Zucker: Erkennen und Beschreiben von formativem Assessment im naturwissenschaftlichen Grundschulunterricht. *Entwicklung eines Instruments zur Erfassung von Teilfähigkeiten der professionellen Wahrnehmung von Lehramtsstudierenden*
ISBN 978-3-8325-4991-6 38.00 EUR
- 282 Victoria Telser: Erfassung und Förderung experimenteller Kompetenz von Lehrkräften im Fach Chemie
ISBN 978-3-8325-4996-1 50.50 EUR
- 283 Kristine Tschirschky: Entwicklung und Evaluation eines gedächtnisorientierten Aufgabendesigns für Physikaufgaben
ISBN 978-3-8325-5002-8 42.50 EUR
- 284 Thomas Elert: Course Success in the Undergraduate General Chemistry Lab
ISBN 978-3-8325-5004-2 41.50 EUR
- 285 Britta Kalthoff: Explizit oder implizit? *Untersuchung der Lernwirksamkeit verschiedener fachmethodischer Instruktionen im Hinblick auf fachmethodische und fachinhaltliche Fähigkeiten von Sachunterrichtsstudierenden*
ISBN 978-3-8325-5013-4 37.50 EUR
- 286 Thomas Dickmann: Visuelles Modellverständnis und Studienerfolg in der Chemie. *Zwei Seiten einer Medaille*
ISBN 978-3-8325-5016-5 44.00 EUR
- 287 Markus Sebastian Feser: Physiklehrkräfte korrigieren Schülertexte. *Eine Explorationsstudie zur fachlich-konzeptuellen und sprachlichen Leistungsfeststellung und -beurteilung im Physikunterricht*
ISBN 978-3-8325-5020-2 49.00 EUR
- 288 Matylda Dudzinska: Lernen mit Beispielaufgaben und Feedback im Physikunterricht der Sekundarstufe 1. *Energieerhaltung zur Lösung von Aufgaben nutzen*
ISBN 978-3-8325-5025-7 47.00 EUR
- 289 Ines Sonnenschein: Naturwissenschaftliche Denk- und Arbeitsprozesse Studierender im Labor
ISBN 978-3-8325-5033-2 52.00 EUR
- 290 Florian Simon: Der Einfluss von Betreuung und Betreuenden auf die Wirksamkeit von Schülerlaborbesuchen. *Eine Zusammenhangsanalyse von Betreuungsqualität, Betreuermerkmalen und Schülerlaborzielen sowie Replikationsstudie zur Wirksamkeit von Schülerlaborbesuchen*
ISBN 978-3-8325-5036-3 49.50 EUR
- 291 Marie-Annette Geyer: Physikalisch-mathematische Darstellungswechsel funktionaler Zusammenhänge. *Das Vorgehen von SchülerInnen der Sekundarstufe 1 und ihre Schwierigkeiten*
ISBN 978-3-8325-5047-9 46.50 EUR
- 292 Susanne Digel: Messung von Modellierungskompetenz in Physik. *Theoretische Herleitung und empirische Prüfung eines Kompetenzmodells physikspezifischer Modellierungskompetenz*
ISBN 978-3-8325-5055-4 41.00 EUR

- 293 Sönke Janssen: Angebots-Nutzungs-Prozesse eines Schülerlabors analysieren und gestalten. *Ein design-based research Projekt*
ISBN 978-3-8325-5065-3 57.50 EUR
- 294 Knut Wille: Der Productive Failure Ansatz als Beitrag zur Weiterentwicklung der Aufgabenkultur
ISBN 978-3-8325-5074-5 49.00 EUR
- 295 Lisanne Kraeva: Problemlösestrategien von Schülerinnen und Schülern diagnostizieren
ISBN 978-3-8325-5110-0 59.50 EUR
- 296 Jenny Lorentzen: Entwicklung und Evaluation eines Lernangebots im Lehramtsstudium Chemie zur Förderung von Vernetzungen innerhalb des fachbezogenen Professionswissens
ISBN 978-3-8325-5120-9 39.50 EUR
- 297 Micha Winkelmann: Lernprozesse in einem Schülerlabor unter Berücksichtigung individueller naturwissenschaftlicher Interessenstrukturen
ISBN 978-3-8325-5147-6 48.50 EUR
- 298 Carina Wöhlke: Entwicklung und Validierung eines Instruments zur Erfassung der professionellen Unterrichtswahrnehmung angehender Physiklehrkräfte
ISBN 978-3-8325-5149-0 43.00 EUR
- 299 Thomas Schubatzky: Das Amalgam Anfangs-Elektrizitätslehreunterricht. *Eine multiperspektivische Betrachtung in Deutschland und Österreich*
ISBN 978-3-8325-5159-9 50.50 EUR
- 300 Amany Annaggar: A Design Framework for Video Game-Based Gamification Elements to Assess Problem-solving Competence in Chemistry Education
ISBN 978-3-8325-5150-6 52.00 EUR
- 301 Alexander Engl: CHEMIE PUR – Unterrichten in der Natur: *Entwicklung und Evaluation eines kontextorientierten Unterrichtskonzepts im Bereich Outdoor Education zur Veränderung der Einstellung zu „Chemie und Natur“*
ISBN 978-3-8325-5174-2 59.00 EUR
- 302 Christin Marie Sajons: Kognitive und motivationale Dynamik in Schülerlaboren. *Kontextualisierung, Problemorientierung und Autonomieunterstützung der didaktischen Struktur analysieren und weiterentwickeln*
ISBN 978-3-8325-5155-1 56.00 EUR
- 303 Philipp Bitzenbauer: Quantenoptik an Schulen. *Studie im Mixed-Methods Design zur Evaluation des Erlanger Unterrichtskonzepts zur Quantenoptik*
ISBN 978-3-8325-5123-0 59.00 EUR
- 304 Malte S. Ubben: Typisierung des Verständnisses mentaler Modelle mittels empirischer Datenerhebung am Beispiel der Quantenphysik
ISBN 978-3-8325-5181-0 43.50 EUR
- 305 Wiebke Kuske-Janßen: Sprachlicher Umgang mit Formeln von LehrerInnen im Physikunterricht am Beispiel des elektrischen Widerstandes in Klassenstufe 8
ISBN 978-3-8325-5183-4 47.50 EUR

306 Kai Bliesmer: Physik der Küste für außerschulische Lernorte *Eine Didaktische Rekonstruktion*
ISBN 978-3-8325-5190-2 58.00 EUR

Alle erschienenen Bücher können unter der angegebenen ISBN direkt online (<http://www.logos-verlag.de>) oder per Fax (030 - 42 85 10 92) beim Logos Verlag Berlin bestellt werden.

Studien zum Physik- und Chemielernen

Herausgegeben von Hans Niedderer, Helmut Fischler und Elke Sumfleth

Die Reihe umfasst inzwischen eine große Zahl von wissenschaftlichen Arbeiten aus vielen Arbeitsgruppen der Physik- und Chemiedidaktik und zeichnet damit ein gültiges Bild der empirischen physik- und chemiedidaktischen Forschung in Deutschland.

Die Herausgeber laden daher Interessenten zu neuen Beiträgen ein und bitten sie, sich im Bedarfsfall an den Logos-Verlag oder an ein Mitglied des Herausgeberteams zu wenden.

Kontaktadressen:

Prof. Dr. Hans Niedderer
Institut für Didaktik der Naturwissenschaften,
Abt. Physikdidaktik, FB Physik/Elektrotechnik,
Universität Bremen,
Postfach 33 04 40, 28334 Bremen
Tel. 0421-218 2484/4695, e-mail:
niedderer@physik.uni-bremen.de

Prof. Dr. Helmut Fischler
Didaktik der Physik, FB Physik, Freie Universität Berlin,
Arnimallee 14, 14195 Berlin
Tel. 030-838 56712/55966, e-mail:
fischler@physik.fu-berlin.de

Prof. Dr. Elke Sumfleth
Didaktik der Chemie,
Fachbereich Chemie,
Universität Duisburg-Essen,
Schützenbahn 70, 45127 Essen
Tel. 0201-183 3757/3761, e-mail:
elke.sumfleth@uni-essen.de

Formeln sind eine wichtige mathematische Darstellungsform im Physikunterricht. Jedoch haben Lernende häufig Schwierigkeiten bei der Verbalisierung der inhaltlichen Bedeutung von Formeln. Dies wirft die Frage auf, wie Lehrende diese inhaltliche Seite von Formeln vermitteln.

Der Theorieteil stellt den Empiriestand zu den Themenkomplexen Formeln und Kommunikation, Alltagssprache, Unterrichtssprache und Fachsprache im Physikunterricht ausführlich dar. Auf Grundlage sprachwissenschaftlicher Überlegungen wurde ein Ebenenmodell der Versprachlichung von Formeln entwickelt und durch Lehrbuchanalysen validiert, mit dessen Hilfe das Sprechen von und über Formeln analysiert werden kann.

In einer qualitativen, explorativ ausgerichteten Feldstudie wurde Physikunterricht von 10 Lehrenden zum elektrischen Widerstand beobachtet und ihre Sprache mit Hilfe der qualitativen Inhaltsanalyse und des entwickelten Ebenenmodells ausgewertet. Das entstandene Kategoriensystem zeigt ein vielfältiges Sprechen über Formeln, das viele Aspekte von Formelverständnis abdeckt. Eine explizite qualitative Interpretation von Formeln bleibt jedoch meist aus. Es zeigt sich in vielen Aspekten ein eher technischer Umgang mit Formeln, der die strukturelle Rolle der Mathematik vernachlässigt. Das Sprechen der Lehrenden im Umgang mit Formeln kann als entweder fachsprachlich, schülernah oder ausgewogen, in einigen Fällen zusätzlich als reflektierend charakterisiert werden.

Logos Verlag Berlin

ISBN 978-3-8325-5183-4